



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un proceso de desinfección de Clostridium spp en aguas de salida de depuradora mediante fotocátalisis solar

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Barranco Herrero, Jesús

Tutor/a: Santos-Juanes Jordá, Lucas

Cotutor/a externo: LOPEZ TIMONER, RUBEN

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es un tema de vital importancia para la salud pública y la preservación del medio ambiente. Las aguas tratadas pueden reutilizarse si alcanzan determinadas calidades que permitirían, por ejemplo, su uso como aguas de riego. Las normativas de reutilización de aguas residuales en aguas de riego requieren la eliminación de algunos restos de materia orgánica no degradada en las depuradoras y la total desinfección de éstas. Aunque el parámetro más empleado para la contaminación biológica es la presencia de la bacteria *Escherichia Coli*, las bacterias anaerobias *Clostridium* han demostrado una mayor resistencia a los tratamientos de desinfección y por ello su estudio se ha incrementado en los últimos años.

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG), se aborda el tema de la desinfección de *Clostridium* en aguas residuales, con el objetivo de evaluar la efectividad de diferentes tratamientos de desinfección para eliminar esta bacteria. El estudio se enfoca en la utilización del proceso foto-Fenton solar (combinación de sales de hierro y peróxido de hidrógeno bajo irradiación solar) aplicados en aguas reales de salida de depuradora. Se ha operado a los pHs naturales de las aguas para que estas técnicas tengan una posible aplicación a gran escala. Para facilitar la actividad del hierro al pH natural se han empleado complejantes.

Se ha visto que la desinfección por luz directa, SODIS, tiene un gran peso en los procesos globales tipo foto-Fenton. La adición de ácido húmico comercial ha mejorado ligeramente el proceso, pero su elevado precio desaconseja su uso. Se ha supuesto un tratamiento en un reactor raceway y se han estimado los costes en presencia de ácido húmico y en ausencia de éste.

Palabras clave: Clostridium; TFG; Escherichia Coli; Complejantes; raceway.

Abstract

*Wastewater treatment is an issue of vital importance for public health and the preservation of the environment. Treated water can be reused if it reaches certain qualities that would allow, for example, its use as irrigation water. The regulations for the reuse of wastewater in irrigation water require the elimination of some traces of non-degraded organic matter in the treatment plants and their total disinfection. Although the most commonly used parameter for biological contamination is the presence of the bacteria *Escherichia coli*, the anaerobic bacteria *Chlostridium* have shown greater resistance to disinfection treatments and therefore their study has increased in recent years. Among the contaminants that can be found in wastewater are microorganisms, some of which can be pathogenic and cause disease. Among these microorganisms is *Clostridium*, a genus of anaerobic bacteria that can be resistant to conventional disinfection treatments.*

*This Final Degree Project (TFG) deals with the disinfection of *Clostridium* in wastewater, with the aim of evaluating the effectiveness of different disinfection treatments to eliminate this bacterium. The study focuses on the use of the solar photo-Fenton process (combination of iron salts and hydrogen peroxide under solar irradiation) applied in real wastewater treatment plant outlet water. It has been operated at the natural pHs of the waters so that these techniques have a possible application on a large scale. Complexing agents were used to facilitate iron activity at natural pH.*

It has been seen that disinfection by direct light, SODIS, has a great weight in the overall photo-Fenton type processes. The addition of commercial humic acid has slightly improved the process, but its high price discourages its use. Treatment in a raceway reactor was assumed and costs were estimated in the presence and absence of humic acid.

Keywords: *Clostridium; Escherichia coli; Complexing agents; raceway.*

Resum

*El tractament d'aigües residuals és un tema de vital importància per a la salut pública i la preservació del medi ambient. Les aigües tractades poden reutilitzar-se si aconseguixen determinades qualitats que permetrien, per exemple, el seu ús com a aigües de reg. Les normatives de reutilització d'aigües residuals en aigües de reg requereixen l'eliminació d'algunes restes de matèria orgànica no degradada en les depuradores i la total desinfecció d'aquestes. Encara que el paràmetre més emprat per a la contaminació biològica és la presència de la bacteri *Escherichia coli*, els bacteris anaerobis *Clostridium* han demostrat una major resistència als tractaments de desinfecció i per això el seu estudi s'ha incrementat en els últims anys.*

*En aquest Treball de Fi de Grau (TFG), s'aborda el tema de la desinfecció de *Clostridium* en aigües residuals, amb l'objectiu d'avaluar l'efectivitat de diferents tractaments de desinfecció per a eliminar aquest bacteri. L'estudi s'enfoca en la utilització del procés foto-Fenton solar (combinació de sals de ferro i peròxid d'hidrogen sota irradiació solar) aplicats en aigües reals d'eixida de depuradora. S'ha operat als pHs naturals de les aigües perquè aquestes tècniques tinguen una possible aplicació a gran escala. Per a facilitar l'activitat del ferro al pH natural s'han emprat complexants.*

S'ha vist que la desinfecció per llum directa, SODIS, té un gran pes en els processos globals tipus foto-Fenton. L'addició d'àcid húmnic comercial ha millorat lleugerament el procés, però el seu elevat preu desaconsella el seu ús. S'ha suposat un tractament en un reactor raceway i s'han estimat els costos en presència d'àcid húmnic i en absència d'aquest.

Paraules clau: *Clostridium; Escherichia coli; complexants; raceway.*

Índice general

Resumen	I
Índice general	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
1. Introducción teórica	1
1.1. Contaminación de las aguas	1
1.2. Tratamiento de aguas	3
1.3. Tipos de tratamientos	5
1.4. Microorganismos en el tratamiento de aguas	6
1.5. Métodos de desinfección fotoquímicos	10
1.6. Eliminación de <i>Clostridium</i>	19
2. Objetivo	22
3. Procedimiento experimental	24
3.1. Reactivos	24
3.2. Material	28
3.3. Procedimiento realizado	36
4. Análisis de datos	41
4.1. Interpretación de los resultados de laboratorio	41
5. Resultados obtenidos	45
5.1. Eliminación de <i>Clostridium</i> respecto al tiempo	45
5.2. Comparación de resultados	50
5.3. Comparaciones generales	54
6. Escalado	58
6.1. Planteamiento	58
6.2. Cálculos realizados	61
6.3. Diseño de la planta	63

7. Estudio económico	66
7.1. Presupuesto de inversión	66
7.2. Presupuesto de explotación	67
7.3. Costes totales	73
7.4. Propuesta alternativa sin ácidos húmicos	73
8. Conclusiones	75
Bibliografía	77

Índice de figuras

1.1. Predicción del estrés hídrico en 2040	2
1.2. Fenómeno SODIS	11
1.3. Proceso de desinfección de fotólisis UV en continuo	13
1.4. Mecanismo de activación energético de un semiconductor	15
1.5. Mecanismo de desinfección de microorganismos mediante la fotocatalisis	16
1.6. Estructura molecular de un ácido húmico	18
1.7. Colonia de bacterias de <i>Clostridium Difficile</i>	19
3.1. Sal disódica del ácido húmico	24
3.2. Imagen del $FeSO_4$ empleado	25
3.3. Peróxido de hidrógeno	26
3.4. Catalasa	27
3.5. Equipo de obtención del agua destilada	27
3.6. Simulador solar	28
3.7. Reactor	29
3.8. Filtro de luz	29
3.9. Agitador	30
3.10. Filtro de membrana	30
3.11. Autoclave	31
3.12. Material de autoclave	31
3.13. Rampa de filtrado	32
3.14. Balanza de precisión	32
3.15. Incubadora	33
3.16. Bomba	33
3.17. Cámara de seguridad biológica	34
3.18. Material de laboratorio	34
3.19. Placa Petri con medio de cultivo	35
3.20. Pinzas	35
3.21. Anaerobe pouch system	36
3.22. Proceso de irradiación	38
3.23. Montaje del proceso de filtrado	39
3.24. Ejemplo de cultivo de <i>Clostridium</i> obtenido	40
5.1. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR	45

5.2. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + AH	46
5.3. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II)	46
5.4. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) + AH	47
5.5. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2	48
5.6. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH	48
5.7. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + H_2O_2	49
5.8. Eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + H_2O_2 + AH	50
5.9. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR y con Agua EDAR + AH	51
5.10. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) y con Agua EDAR + Fe(II) + AH	52
5.11. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 y con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH	53
5.12. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 y con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH	54
5.13. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> de experimentos sin Ácidos Húmicos	55
5.14. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> de experimentos con Ácidos Húmicos	55
5.15. Comparación de eliminación de <i>Clostridium</i> de experimentos con Ácidos Húmicos	56
6.1. Reactor <i>Raceway</i> (Sánchez et al., 2022)	59
6.2. Montaje del escalado. (a) Bombas de dosificación,(b) Molino de agitación,(c) Balsa reactor <i>Raceway</i> (Gualda-Alonso et al., 2022)	60
6.3. Irradiación solar horizontal en España (Solargis, s.f.)	61
6.4. Diseño completo para la planta de desinfección. (a) Bombas de dosificación,(b) Molino de agitación,(c) Balsa reactor <i>Raceway</i> , (d) tanque de acondicionamiento, (e) filtro de carbonato de calcio, (f) tanque de almacenamiento (Gualda-Alonso et al., 2022)	64
6.5. Gradiente de pH en el proyecto de CIESOL (Gualda-Alonso et al., 2022)	64
6.6. Diagrama de flujo del proceso de desinfección	65

Índice de tablas

1.1. Síntesis del tratamiento de aguas	6
1.2. Principales microorganismos encontrados en aguas residuales (Tobón et al., 2017)	8
3.1. Propiedades de los Ácidos húmicos usados	24
3.2. Propiedades del $FeSO_4$ usado	25
3.3. Propiedades del H_2O_2 usado	26
3.4. Propiedades de la <i>Catalasa</i> usada	27
3.5. Características del agua usada	28
3.6. Características del simulador solar	28
3.7. Caption	29
3.8. Características de los filtros de membrana	30
3.9. Características de la bomba	33
3.10. Tabla de disoluciones usadas en el filtrado	39
4.1. Resultados obtenidos en las condiciones 5 (1)	41
4.2. Resultados obtenidos en las condiciones 5 (2)	42
4.3. Resultados obtenidos en las condiciones 5 (3)	43
4.4. Resultados obtenidos en las condiciones 5 (4)	44
4.5. Resultados obtenidos en las condiciones 5 (5)	44
7.1. Equipo necesario para el montaje de la planta junto a su precio	67
7.2. Coste de personal	69
7.3. Precios y cantidades de reactivos por m3 de agua	72
7.4. Precios y cantidades de reactivos por m3 de agua del presupuesto 2	73

1 Introducción teórica

1.1 Contaminación de las aguas

La falta de acceso a suministros suficientes de agua dulce para satisfacer las necesidades de subsistencia tanto humanas como ambientales se conoce como escasez de agua. Numerosos factores, incluidos el crecimiento de la población, el cambio climático, la mala gestión de los recursos hídricos, la contaminación y los patrones de consumo insostenibles, exacerban esta situación.

La escasez de agua es una realidad cotidiana en muchas partes del mundo, particularmente en las regiones áridas y semiáridas. Las necesidades básicas de beber, cocinar, higiene personal y agricultura son difíciles de satisfacer para las comunidades que dependen de fuentes de agua escasas. Además, la falta de acceso a agua limpia y saneamiento adecuado tiene efectos perjudiciales en la salud pública, provocando la propagación de enfermedades y la muerte de personas. (O. T. Rice et al., [2012](#))

Una de las principales causas de la escasez mundial de agua, que se agudiza, es el cambio climático. Los cambios en los patrones de lluvia, los períodos secos más prolongados y frecuentes y un aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones y tormentas, son todos indicadores de esto. Tanto las comunidades humanas como los ecosistemas se ven impactados negativamente por estos fenómenos, que tienen un efecto adverso en la cantidad y calidad del agua. (Organization, [2006b](#))

La escasez de agua también se ve influida significativamente por la mala gestión de los recursos hídricos. El problema se agrava por los desechos, la falta de infraestructura adecuada para el almacenamiento y distribución de agua, así como la sobre-explotación de los acuíferos subterráneos. La cantidad de agua potable también disminuye debido a actividades industriales, agrícolas y domésticas que contaminan las fuentes de agua. (Organization, [2006b](#))

A continuación, se presenta un mapa que predice el estrés hídrico que presentara el planeta en el 2040:

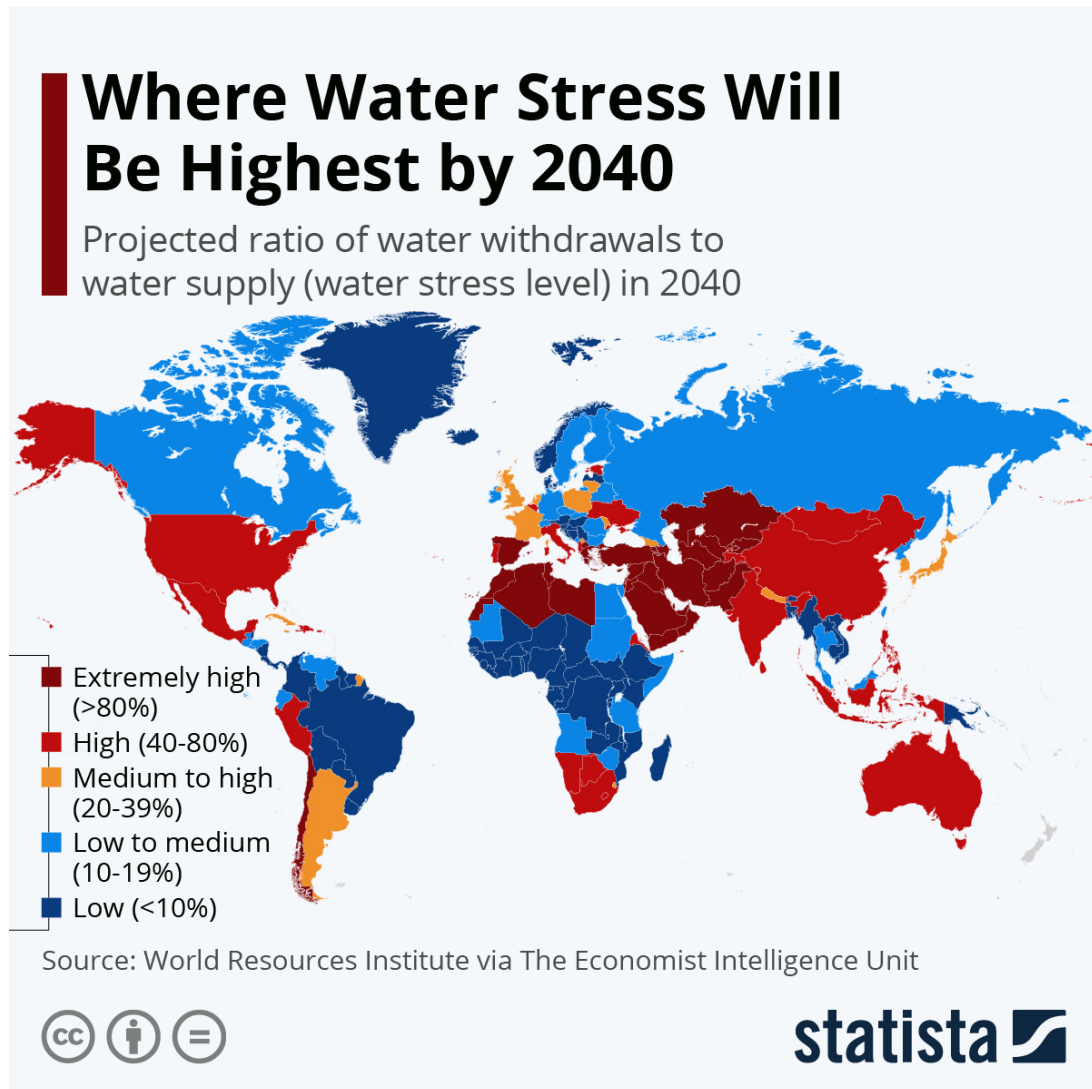


Figura 1.1: Predicción del estrés hídrico en 2040

Los problemas ambientales derivados de los cambios en el panorama social, económico y climático del mundo provocan una escasez crítica de agua. Para combatir esto, se lleva a cabo la exploración de nuevos métodos tecnológicos y la investigación sobre la desinfección y el tratamiento de aguas emergentes en campos como la agricultura y la industria.

Con esta variedad de fuentes, el agua ha sido contaminada tanto por microorganismos patógenos como por microcontaminantes orgánicos (OMC), pesticidas y fertilizantes. Tal contaminación tiene un efecto extenso sobre el medio ambiente y también puede ser perjudicial para la salud pública. El uso de compuestos clorados durante la etapa de lavado suele ser la opción preferida para reducir la actividad microbiológica, pero esto puede conducir a la producción de sustancias nocivas cuando se usa agua excesivamente rica en inorgánicos, algunos países europeos han prohibido el uso de compuestos clorados en la industria alimentaria. Además, la cloración no previene la acumulación de OMC's durante el proceso industrial, ya que su efectividad en la eliminación de estos es baja. (Organization, 2006b)

1.2 Tratamiento de aguas

Para garantizar la protección del medio ambiente y para la potabilización de agua para consumo humano se requiere de tratamientos físico-químicos aplicados a aguas residuales de diferentes fuentes.

Purificar y limpiar el agua para que sea segura para su uso en diversas aplicaciones es de lo que se trata el tratamiento del agua. Es un proceso crucial que asegura la salud pública, mantiene la protección del medio ambiente y garantiza un suministro sostenible de agua potable como recurso limitado que es. (Metcalf, 2003)

Dependiendo de factores como los requisitos de la comunidad, las reglamentaciones legales y la fuente de agua, puede haber variaciones únicas en el proceso de tratamiento del agua. Por lo general, hay varias etapas para el tratamiento del agua:

1. Captación: El agua se captura, dependiendo de esta fuente donde se extrae el agua el proceso variara más o menos.
2. Pre-tratamiento: El agua se somete a un pre-tratamiento para eliminar sólidos grandes, como ramas, hojas, arena y otros materiales.
3. Coagulación y floculación: Se agrega un coagulante al agua para atraer y unir partículas finas. Luego, un agente floculante se agrega para formar "flocs", que son agrupaciones de partículas más grandes.
4. Sedimentación: Los "flocs" se asientan al fondo en un tanque de sedimentación, donde se separan del agua.
5. Filtración: El agua clarificada se filtra a través de diferentes capas de materiales de filtro, como arena, grava y carbón activado, para eliminar las partículas más pequeñas y algunos de los contaminantes.
6. Desinfección: Se agrega un desinfectante, como cloro, para matar los microorganismos que pueden estar presentes en el agua.
7. Acondicionamiento: El agua tratada se ajusta para cumplir con los requisitos de calidad del agua potable. Esto puede implicar la adición de productos químicos, como fluoruro, para mejorar la salud dental, o la eliminación de minerales, como el hierro, que pueden hacer que el agua tenga un sabor desagradable.
8. Almacenamiento y distribución: El agua tratada se almacena en un tanque de almacenamiento y se distribuye a través de una red de tuberías a hogares y empresas.

Dentro de los parámetros empleados en química ambiental y la utilización de sus métodos de tratamiento en los contaminantes orgánicos, caben destacar los siguientes parámetros de medida:

- Carbono Orgánico Total (COT o TOC), como su propio nombre indica nos da la cantidad de carbono orgánico que hay en una muestra, expresado en mg C/L. Si está

relacionado con sustancias inorgánicas se mide el Carbono Inorgánico Total (TIC), normalmente carbonatos o bicarbonatos, y el Carbono Total (TC), es la suma del orgánico y del inorgánico.

- Carbono Orgánico Disuelto (COD o DOC), es la misma medida que el COT, pero con un previo filtrado de la muestra con filtros de $0,45\mu m$.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO o COD), mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica a CO_2 , H_2O y sales inorgánicas, expresado en $mg O_2/L$. Se encuentra influida por el estado de oxidación. Muy empleada en aguas urbanas debido a que la composición promedio es constante.
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO o BOD), mide la cantidad de oxígeno disuelto para oxidar completamente la materia orgánica a CO_2 , H_2O y sales inorgánicas mediante métodos biológicos, expresada en $mg O_2/L$, es una medida de biodegradabilidad.

La toxicidad es definida como la capacidad que tiene una sustancia para llegar a generar problemas en los tejidos vivos, lesiones en el sistema nervioso central, considerándose una enfermedad grave que puede llegar a la muerte. Esta característica que presentan los compuestos se considera por tanto una característica no deseada. Puede encontrarse por bioacumulación de contaminantes o simplemente porque algunos compuestos tienen la capacidad de poseerla por si solos.

El tratamiento y cuidado seguro del agua es una práctica crítica porque no elimina todos los contaminantes. Aunque no es un proceso perfecto, sirve para reducir la presencia de agentes nocivos en el agua.

Diferentes factores, como el cambio climático, la industrialización, la urbanización y la contaminación, pueden afectar la calidad del agua, que es un recurso limitado y valioso.

Diferentes técnicas de tratamiento son esenciales para asegurar la calidad y disponibilidad del agua. Estas técnicas varían según las características y el origen del agua, y pueden involucrar procesos físicos, químicos o biológicos.

1.3 Tipos de tratamientos

El tratamiento de aguas se divide en diferentes etapas, estas son tratamiento primario, secundario y terciario. A continuación, se explican detalladamente estas etapas:

1.3.1 *Tratamiento primario*

El tratamiento primario es la primera etapa del tratamiento de aguas. Este proceso se centra en la eliminación de sólidos suspendidos y materiales flotantes del agua. En esta etapa, el agua es sometida a pre-tratamientos químicos como la neutralización para la normalización del pH a alrededor de 6.5 y 7 y posteriormente a una serie de procesos físicos, como la sedimentación, la flotación, la filtración gruesa y otras técnicas como el uso de fosas sépticas, lagunaje o filtros verdes para eliminar las partículas grandes. Durante la sedimentación, el agua se almacena en un tanque y las partículas más pesadas se asientan en el fondo del tanque. El agua clarificada en la parte superior del tanque se transfiere a la siguiente etapa de tratamiento. (E. W. Rice et al., 2012)

1.3.2 *Tratamiento secundario*

Después del tratamiento primario, el agua tratada se somete al tratamiento secundario. El objetivo principal de esta etapa es eliminar los contaminantes disueltos y biodegradables, como los nutrientes y los productos químicos orgánicos. El tratamiento secundario se realiza mediante un proceso biológico llamado digestión aerobia. En este proceso, los microorganismos aeróbicos descomponen los contaminantes orgánicos presentes en el agua y los convierten en dióxido de carbono y agua, y también derivados del nitrógeno que mediante una nitrificación que se acaban convirtiendo en nitratos que no son tóxicos y que favorecen el crecimiento de algas. Para este proceso se utilizan diferentes sistemas, como los reactores biológicos secuenciales, los lodos activados, lechos bacterianos, filtros verdes. También cabe destacar que se pueden usar métodos anaerobios donde se recurren a reacciones fermentativas en tanques cerrados con ausencia de oxígeno en las que la materia orgánica se convierte en energía, metano y dióxido de carbono.

1.3.3 *Tratamiento terciario*

El tratamiento terciario es la última etapa del tratamiento de aguas y se utiliza para eliminar los contaminantes y bacterias que no se eliminan en las etapas anteriores. En esta, se utilizan procesos físicos y químicos avanzados para eliminar las bacterias y contaminantes persistentes y difícilmente tratables. Los procesos de tratamiento terciario pueden incluir la filtración fina, la desinfección química y desinfección fotoquímica. Entre estos podemos encontrar la desinfección con luz ultravioleta, la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la microfiltración o la cloración, entre otros. El tratamiento terciario se utiliza principalmente para producir agua de alta calidad para usos específicos, como la agricultura, la industria y el consumo humano directo.

TRAT. PRIMARIO	TRAT. SECUNDARIO	TRAT. Terciario
Homogeneización	Tratamientos biológicos	Procesos membrana
Neutralización	Fangos activos	Microfiltración
Ajuste de pH	Filtros precoladores	Ultrafiltración
Desbaste/dilaceración	Lagunaje	Ósmosis inversa
Desarenado	Digestión anaerobia	Electrodiálisis
Sedimentación	Biodiscos	Procesos de oxidación avanzada
Filtración		Intercambio iónico
Flotación		Adsorción carbón activo
Coagulación/Floculación		Procesos redox

Tabla 1.1: Síntesis del tratamiento de aguas

En resumen, el tratamiento de aguas primario se enfoca en la eliminación de sólidos suspendidos y materiales flotantes del agua, el tratamiento secundario se enfoca en la eliminación de los contaminantes disueltos y biodegradables, y el tratamiento terciario se enfoca en la eliminación de los contaminantes persistentes y difícilmente tratables. Juntos, estos procesos forman un sistema de tratamiento integral para producir agua limpia y segura para su uso en diferentes aplicaciones. (Organization, 2006b)

1.4 Microorganismos en el tratamiento de aguas

Según su tipo y función, los microorganismos que se encuentran en las aguas residuales se pueden dividir en diferentes grupos. La siguiente lista de algunos de los grupos más populares:

1. Bacterias aeróbicas: Estos organismos microscópicos, que dependen del oxígeno para sobrevivir, se encargan de destruir la materia orgánica del agua. Estos microorganismos transforman los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono y agua. *Pseudomonas*, *Aeromonas* y *Achromobacter* son algunos ejemplos de bacterias aeróbicas típicas que se encuentran en las aguas residuales.
2. Las bacterias anaerobias son organismos microscópicos que pueden vivir sin oxígeno y se encargan de descomponer la materia orgánica en el agua cuando no hay oxígeno presente. Estos microorganismos tienen la capacidad de transformar los contaminantes orgánicos en gases como el metano. *Clostridium*, *Methanobacterium* y *Desulfovibrio* son algunos ejemplos de microorganismos anaerobios típicos que se encuentran en las aguas residuales.
3. Los hongos son organismos microscópicos que consumen materia orgánica y son cruciales para la descomposición de los contaminantes orgánicos. Entre los hongos típicos que se encuentran en las aguas residuales se encuentran *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*.
4. Algas: Estos son organismos fotosintéticos microscópicos que pueden limpiar algunos contaminantes orgánicos del agua y producir oxígeno. La salud de las personas y

los ecosistemas acuáticos pueden verse afectados negativamente por las algas, que pueden producir toxinas y reducir el contenido de oxígeno del agua cuando están presentes en grandes cantidades.

5. Los protozoos son microorganismos unicelulares que consumen otros microorganismos y materia orgánica en el agua para alimentarse. Los protozoos como *Giardia*, *Cryptosporidium* y *Entamoeba* se encuentran con frecuencia en las aguas residuales.
6. Los virus son microbios contagiosos que pueden dañar tanto a humanos como a animales si se ingieren o entran en contacto con agua contaminada. La hepatitis A, Norwalk y el virus del papiloma humano son algunos de los virus que se encuentran con frecuencia en las aguas residuales. (Fijalkowski et al., 2014)

El objetivo de la desinfección en este proceso de tratamiento de aguas es la eliminación de microorganismos patógenos que puedan encontrarse en el agua a tratar y no se ha conseguido eliminar mediante las técnicas de tratamiento anteriores a este paso como se ve en la [sección 1.2](#).

Estos microorganismos pueden encontrarse en las aguas a tratar por diversos motivos. Entre ellos pueden deberse a que las personas y los animales excretan microorganismos en sus heces y orina, se pueden encontrar microorganismos en las aguas residuales. Debido a que estos productos de desecho orgánicos son ricos en nutrientes, los microorganismos pueden prosperar y reproducirse allí. (Buxton et al., 1988)

Es crucial recordar que las aguas residuales no tratadas pueden contener una gran cantidad de microorganismos peligrosos que podrían poner en peligro la salud pública.

A continuación, se presenta la [tabla 1.2](#), que contiene algunos de los microorganismos patógenos encontrados en aguas residuales, su clasificación como microorganismo y su riesgo asociado. Este riesgo asociado a cada microorganismo, puede variar según la persona o la cantidad ingerida.

Microorganismo	Tipo	Riesgos
<i>Escherichia coli</i>	Bacteria	Infecciones gastrointestinales
<i>Salmonella spp.</i>	Bacteria	Infecciones gastrointestinales
<i>Vibrio cholerae</i>	Bacteria	Cólera
<i>Cryptosporidium spp.</i>	Protozoo	Diarrea, náuseas, vómitos
<i>Giardia lamblia</i>	Protozoo	Diarrea, náuseas, vómitos
<i>Rotavirus</i>	Virus	Diarrea, vómitos, fiebre
<i>Norovirus</i>	Virus	Diarrea, vómitos, fiebre
<i>Adenovirus</i>	Virus	Enfermedades respiratorias
<i>Clostridium</i>	Bacteria	Diarrea y afecciones intestinales
Virus de Hepatitis (VHA)	Virus	Hepatitis A
<i>Escherichia coli</i>	Bacterias	Gastroenteritis
<i>Norovirus</i>	Virus	Gastroenteritis
<i>Giardia lamblia</i>	Protozoos	Gastroenteritis
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Helmintos	Infección intestinal
<i>Candida albicans</i>	Hongos	Infecciones de piel y mucosas

Tabla 1.2: Principales microorganismos encontrados en aguas residuales (Tobón et al., 2017)

1.4.1 Eliminación de microorganismos

Aunque existen varios métodos de desinfección, la elección del método adecuado depende de varios factores, incluyendo el tipo y la cantidad de microorganismos presentes, el grado de tratamiento requerido y los costos asociados. (Gray, 2004)

En la actualidad los métodos más usados y efectivos para llevar a cabo esta desinfección son:

1. Desinfección con cloro: para matar bacterias, virus y otros microorganismos, el cloro es un oxidante altamente efectivo que se usa con frecuencia en el tratamiento de aguas residuales. La producción de cloro *in situ* mediante electrólisis también es una opción además de la adición directa al agua. Por otro lado, el uso de cloro puede resultar en la producción de subproductos tóxicos como trihalometanos, que pueden ser peligrosos tanto para la salud humana como para el medio ambiente.
2. Desinfección con ozono: Utilizado en el tratamiento de aguas residuales para eliminar compuestos orgánicos y microorganismos, el ozono es un oxidante muy potente. El ozono se crea en el sitio cuando las descargas eléctricas dividen el oxígeno. Dado que el ozono no produce subproductos tóxicos, es un sustituto más seguro y eficiente del cloro. (Johnson et al., 2020)
3. Usando radiación ultravioleta para matar bacterias y virus, las aguas residuales se pueden desinfectar. Los microorganismos son eliminados por la radiación ultravioleta, debido a que esta daña el material genético de los microorganismos, lo que impide su reproducción, cuando se exponen a una luz intensa que se encuentra dentro de un cierto rango de longitud de onda. Aunque necesita una fuente de energía eléctrica y un mantenimiento regular de la lámpara UV, este método es seguro y eficiente.
4. Desinfección con dióxido de cloro: para matar bacterias, virus y otros microorganismos, el dióxido de cloro es un oxidante que se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. La mezcla de soluciones de clorito y ácido produce dióxido de cloro en el sitio. En algunas aplicaciones, podría ser más eficaz que el ozono y el cloro.
5. El uso de peróxido de hidrógeno para desinfectar el agua mata las bacterias y los virus. El peróxido de hidrógeno es un oxidante utilizado en el tratamiento de aguas residuales. La producción de peróxido de hidrógeno *in situ* implica combinar peróxido y soluciones ácidas. Es un sustituto del cloro y el ozono que podría ser más eficiente en algunas situaciones. Pero en altas concentraciones, el peróxido de hidrógeno puede ser venenoso.

Cabe destacar que en todos los casos descritos, salvo en el caso de la ozonización que es obligatorio debido a su rápida descomposición, cabe la posibilidad de producción del oxidante *in situ* para evitar problemas de almacenamiento o transporte.

1.5 Métodos de desinfección fotoquímicos

Debido a lo mencionado en [sección 1.1](#), se ha incrementado el interés reciente en la investigación y evaluación de nuevos o alternativos tratamientos de agua que puedan reducir simultáneamente la contaminación microbiológica y química asociada a esta industria sin generar subproductos de desinfección.

Dichas investigaciones llevan a la implementación y mejora de nuevas técnicas de desinfección en, sobre todo, tratamientos terciarios mencionados en [sección 1.3](#).

La rama de desinfección terciaria de mayor interés y con mayor cantidad de trabajo de estudio es la fotoquímica. La fotoquímica es la rama de la química que estudia los procesos químicos que ocurren a través de la absorción de luz. En esta disciplina, se investiga las interacciones a nivel molecular entre la materia y la energía radiante, provocando una serie de reacciones químicas que pueden ser útiles para diversos fines.

Uno de los procesos más importantes de la fotoquímica es la fotosíntesis, que es la capacidad de las plantas para convertir la energía solar en carbohidratos. En este proceso, la luz es absorbida por los pigmentos de la planta, como la clorofila, y se utilizan para producir glucosa. (Gray, 2004)

Otro proceso importante en la fotoquímica es la fotodegradación. En este proceso, los contaminantes y microorganismos en el agua y el aire pueden ser eliminados mediante la exposición a la luz, lo que provoca una serie de reacciones que descomponen estos contaminantes en compuestos menos tóxicos.

Pero en este trabajo cabe centrarse en la parte de la fotoquímica capaz de tratar y desinfectar aguas residuales.

La desinfección de aguas mediante este tipo de tratamientos fotoquímicos se usa la luz ultravioleta procedente de la luz solar y fotocatalizadores para eliminar microorganismos en el agua. Este proceso se basa en la capacidad de los fotones para excitar los catalizadores fotocatalíticos y generar radicales libres, que tienen la capacidad de oxidar compuestos orgánicos y de inactivar microorganismos presentes en el agua. (Smith et al., 2018)

1.5.1 *Desinfección solar (SODIS)*

Una forma rápida y eficiente de purificar el agua con energía solar es el fenómeno SODIS, también conocido como desinfección solar del agua. Particularmente en áreas rurales y países en desarrollo, SODIS se usa con frecuencia en lugares con poco o ningún acceso a agua potable limpia. (McGuigan et al., 2012)

La inactivación de microorganismos y la degradación de compuestos químicos son las dos reacciones principales que impulsan el proceso SODIS. A continuación, se explica más en detalle estas reacciones:.

Inactivación de microorganismos: Eliminar las bacterias dañinas que están presentes en el agua es el objetivo principal de SODIS. Para lograr esta inactivación, la radiación solar actúa principalmente a través de dos mecanismos:

- Radiación UV-A: La radiación UV de tipo A (315 – 400nm), que está presente en la luz solar y se filtra en el agua, tiene un impacto directo sobre los microorganismos, en particular los virus y las bacterias. El ADN de estos microorganismos se ve dañado por la energía de los fotones UV-A, lo que les impide reproducirse y propagar enfermedades.
- Calentamiento solar: el agua en botellas transparentes también se calienta con energía solar. Dado que muchos microorganismos no pueden sobrevivir a temperaturas superiores a 50 °C, el aumento de la temperatura ayuda a la inactivación de estos organismos.

El fenómeno SODIS utiliza una combinación de estos dos mecanismos para purificar el agua. Es crucial recordar que SODIS tiene sus limitaciones y factores a tener en cuenta:

- Calidad y transparencia de las botellas: El proceso SODIS requiere el uso de botellas transparentes que estén libres de imperfecciones porque cualquier obstrucción a la luz solar puede disminuir la eficiencia del proceso.
- Duración de la exposición: El agua debe estar expuesta a la radiación solar durante un período de tiempo suficiente para lograr un nivel adecuado de desinfección. Se recomienda un tiempo mínimo de exposición de 6 horas en condiciones ideales de sol. Puede ser necesario un mayor tiempo de exposición en días nublados o días con luz solar menos intensa.



Figura 1.2: Fenómeno SODIS

El agua turbia o que contiene mucha materia orgánica tendrá menos efecto de SODIS. Se aconseja filtrar o decantar el agua en estas situaciones antes de someterla al proceso SODIS.

El fenómeno SODIS, en esencia, utiliza la radiación solar para matar bacterias dañinas y descomponer los químicos que se encuentran en el agua. A pesar de ser un método sencillo y asequible, es crucial comprender sus limitaciones y seguir las instrucciones correctas para garantizar que el agua se purifique de manera efectiva. (Kirchhoff et al., 2013)

1.5.2 Fotólisis directa con UV

La fotólisis UV, también conocida como fotodisociación o fotodegradación, es una reacción química que tiene lugar cuando una molécula se expone a la radiación UV, lo que hace que se desintegre en componentes más básicos. Debido a su papel fundamental en la química atmosférica, la formación de ozono y la degradación de contaminantes, este fenómeno es sumamente significativo tanto en la atmósfera terrestre como en otros ambientes.

Según su longitud de onda, la radiación ultravioleta del sol se puede clasificar en tres categorías: UV-A (315 – 400nm), UV-B (280 – 315nm) y UV-C (100 – 280nm). La capa de ozono en la estratosfera absorbe una gran parte de los rayos UVC, por lo que solo los rayos UVA y UVB llegan a la superficie de la Tierra. Estos rayos UV pueden alterar la composición química de las moléculas porque son mucho más energéticos que la radiación visible. (García et al., 2019)

Una molécula puede alcanzar un estado electrónico excitado cuando se expone a la radiación ultravioleta y puede absorber esa energía. Esta energía de excitación puede inducir reacciones químicas que no tendrían lugar naturalmente. La homólisis de enlace, en la que un enlace químico se rompe homolíticamente, es decir, cada átomo involucrado en el enlace acepta un electrón, es un tipo de reacción típica provocada por la fotólisis UV.

Numerosos sistemas químicos se ven afectados por la fotólisis UV de diversas formas. Por ejemplo, la radiación ultravioleta en la atmósfera terrestre provoca la descomposición del ozono (O_3) en oxígeno (O_2), que es un paso crucial en la creación y descomposición del ozono estratosférico. La fotólisis UV en la estratosfera es responsable de la absorción de la radiación UVB y UVC por parte del ozono, protegiéndonos de los efectos nocivos de esta radiación en la superficie de la Tierra.

El uso de radiación ultravioleta (UV) para matar o inactivar microorganismos como bacterias, virus y otros patógenos se conoce como desinfección de microorganismos. La fotólisis UV se basa en la idea de que ciertas longitudes de onda de luz UV pueden dañar el ADN y el ARN de estos microorganismos, evitando que se reproduzcan y provocando su muerte o inactivación. (Zepp et al., 2002)

Según su longitud de onda, la radiación UV se divide en tres grupos: UV-A, UV-B y UV-C. La radiación UV-C, que tiene una longitud de onda entre 200 y 280 nanómetros (nm), se utiliza principalmente en la fotólisis UV. El daño directo que puede causar al material genético de los microorganismos hace que esta longitud de onda sea particularmente efectiva para la desinfección. (Zepp et al., 2002)

En la mayoría de los casos, se utilizan lámparas UV-C especializadas que emiten luz en la longitud de onda requerida para realizar la desinfección por fotólisis UV. Estas lámparas están diseñadas específicamente para aumentar la producción de UV-C y disminuir la emisión de UV-A y UV-B, que son menos útiles para la desinfección.

Cuando los microorganismos se exponen a la radiación UV-C, el ADN y el ARN dentro de las células se dañan directamente por la energía de los fotones UV. Esto tiene varios efectos nocivos sobre los microorganismos, como la creación de enlaces cruzados genéticos,

la ruptura de cadenas de ADN y ARN y el desarrollo de dímeros de timina. Estas alteraciones estructurales impiden que los microorganismos se reproduzcan y se transcriban con normalidad, lo que finalmente provoca que mueran o se vuelvan inactivos. (Zepp et al., 2002)

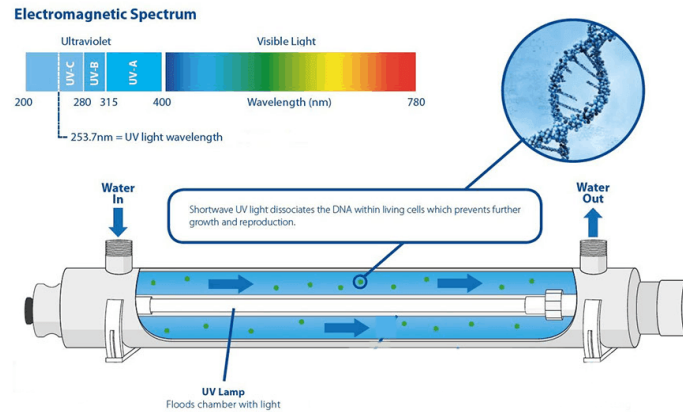


Figura 1.3: Proceso de desinfección de fotólisis UV en continuo

La cantidad de radiación UV utilizada, la duración de la exposición, el calibre de las lámparas UV y la separación entre la fuente de radiación y los microorganismos son variables que afectan la efectividad de la desinfección por fotólisis UV. Los microorganismos deben estar expuestos a suficiente radiación UV-C para ser inactivados de manera efectiva a fin de garantizar que se produzca una desinfección adecuada.

La fotólisis UV es una técnica de desinfección común utilizada en muchas aplicaciones diferentes, incluida la purificación de agua, la desinfección del aire, la esterilización de superficies y la desinfección de equipos médicos. Es especialmente útil en entornos donde se requiere una desinfección rápida y eficaz sin el uso de productos químicos adicionales.

Es crucial recordar que no todos los tipos de microorganismos son susceptibles a la fotólisis UV y que algunos patógenos pueden ser más resistentes a los rayos UV que otros. Además, utilizar este método de desinfección requiere tomar las precauciones necesarias porque la exposición directa a la radiación UV-C puede ser perjudicial para las personas y otros seres vivos.

1.5.3 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis heterogénea es un proceso en el que se utiliza la energía de la luz para promover reacciones químicas en la superficie de un catalizador. En la fotocatálisis heterogénea, el catalizador es un material semiconductor que absorbe la energía de la luz y utiliza esta energía para crear portadores de carga eléctrica que pueden participar en reacciones químicas en la superficie del catalizador.

En el proceso de fotocatálisis heterogénea, el catalizador se expone a la luz y absorbe la energía de los fotones. Esto crea un exceso de electrones y huecos en el material semicon-

ductor, que pueden reaccionar con las moléculas que se encuentran en la superficie del catalizador.

La IUPAC define la fotocatalisis como “la aceleración de una reacción química por actuación de un catalizador sólido activado mediante excitación electrónica al incidir sobre él radiación luminosa de un determinado contenido energético”.

En primer lugar, fotocatalizador se define como: “compuesto que tras una absorción de luz es capaz de producir transformaciones químicas en los reactivos, formando intermediarios de reacción y regenerándose tras cada ciclo”. Algunos de ellos son: el dióxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO), dióxido de estaño (SnO_2), trióxido de wolframio (WO_3), sulfuro de cadmio (CdS). Siendo el más usado el dióxido de titanio (TiO_2) debido a su buena selectividad que solo le permite absorber radiación UV y su bajo costo. (Armijos Guamán & Coronel Carrión, 2022)

Desde un punto de vista fotoquímico, un material semiconductor es el que tiene la capacidad de absorber la energía de la luz y utilizarla para crear portadores de carga eléctrica (electrones y huecos).

Cuando un semiconductor absorbe luz, si la $h\nu$ de los fotones es igual o mayor a la energía del salto de banda E_g del semiconductor en cuestión, permitiendo saltar a un electrón a la banda de conducción y crear huecos (lugares vacantes en la estructura) en la banda de valencia. Estos electrones y huecos pueden moverse y conducir electricidad a través del material, lo que lo convierte en un conductor fotovoltaico.

Esta propiedad se conoce como efecto fotovoltaico y es la base de la tecnología solar fotovoltaica. Los semiconductores fotovoltaicos se utilizan en células solares, que son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad. Estas células solares están compuestas de capas de diferentes materiales semiconductores que trabajan juntos para absorber la mayor cantidad posible de energía solar y generar corriente eléctrica. (Durán-Álvarez et al., 2015)

Para el dióxido de titanio la energía de banda prohibida es $EBP = 3,2eV$, por lo que son necesarios fotones con una longitud de onda inferior a 387 nm para pasar los electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción.

A continuación, se muestra más en detalle del proceso de activación de un fotocatalizador y la formación de los radicales hidroxilo:

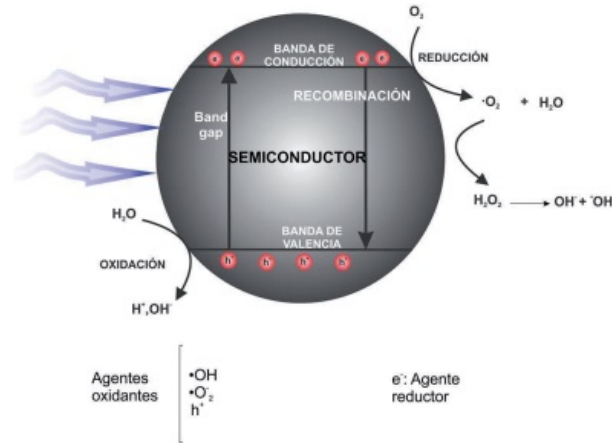
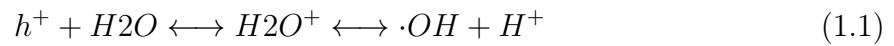


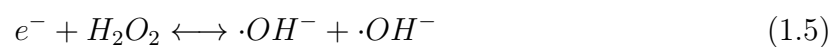
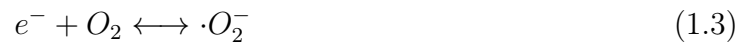
Figura 1.4: Mecanismo de activación energético de un semiconductor

Los huecos foto-formados en la superficie del semiconductor presentan carga positiva y pueden oxidar a las moléculas de agua o a cualquier otro componente adsorbido en el catalizador, y con ello generar especies altamente oxidantes, tal y como se muestra en la [Ecuación 1.1](#) y la [Ecuación 1.2](#):



Una vez formados, los radicales hidroxilo activados ($\cdot OH$) actúan como agentes oxidantes fuertes. Por otro lado, los electrones promovidos hacia la banda de conducción del semiconductor reaccionan con las moléculas de oxígeno adsorbidas para producir el radical superóxido ($\cdot O_2^-$), como se muestra en la [Ecuación 1.3](#). (Armijos Guamán & Coronel Carrión, 2022)

Estos radicales son rápidamente convertidos en peróxido de hidrógeno ([Ecuación 1.4](#)) y, posteriormente, en radicales hidroxilo activados ([Ecuación 1.5](#)).



El dióxido de titanio, como ejemplo de fotocatalizador, funciona como un agente bactericida cuando se usa para desinfectar microorganismos en aguas residuales. Cuando los

microorganismos entran en contacto con la superficie del dióxido de titanio activado por UV, los radicales hidroxilo atacan y oxidan las partes internas de los microorganismos y las membranas celulares, lo que hace que mueran o se vuelvan inactivos.

Es fundamental enfatizar que el proceso de desinfección fotocatalítica con dióxido de titanio depende en gran medida de la intensidad de la luz ultravioleta, la concentración de dióxido de titanio y el tiempo de exposición. Para lograr una desinfección efectiva, es fundamental garantizar una fuente de luz UV adecuada y una distribución constante de dióxido de titanio en las aguas residuales.

El dióxido de titanio es efectivo para degradar contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales además de su capacidad para desinfectar microorganismos. Los radicales hidroxilo producidos por oxidación fotocatalítica atacan y degradan los compuestos orgánicos, convirtiéndolos en productos más simples y menos nocivos.

Aunque la desinfección fotocatalítica con dióxido de titanio tiene una serie de ventajas, como no requerir productos químicos adicionales y tener la capacidad de tratar una variedad de microorganismos y compuestos orgánicos, también tiene algunos inconvenientes. Uno de ellos es la necesidad de una fuente de luz ultravioleta confiable y constante, así como la necesidad de preparar adecuadamente el dióxido de titanio y distribuirlo uniformemente en las aguas residuales.

En resumen, el uso de dióxido de titanio como fotocatalizador en la desinfección de aguas residuales ofrece un sustituto prometedor y eficiente para eliminar microorganismos y compuestos orgánicos. El proceso respetuoso con el medio ambiente de la fotocatalisis de dióxido de titanio puede ayudar a purificar y reutilizar las aguas residuales de forma segura.

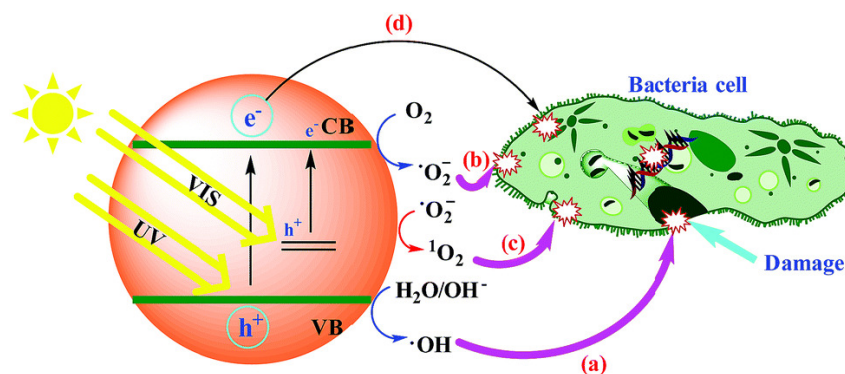


Figura 1.5: Mecanismo de desinfección de microorganismos mediante la fotocatalisis

La eficiencia de las reacciones descritas depende de cuatro factores: a) la absorción de luz por el semiconductor; b) la separación del par hueco-electrón; c) la migración de los pares foto-productos hacia la superficie del catalizador, y, d) la velocidad de recombinación de los pares hueco-electrón que se hayan foto-formado.

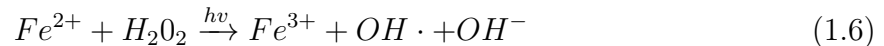
1.5.4 Foto-Fenton

El proceso foto-Fenton es un método sofisticado de purificación de agua que utiliza fotocatalisis y tecnología Fenton para la desinfección de aguas residuales de microorganismos patógenos. Este método se basa en la producción de radicales hidroxilo (OH) extremadamente potentes, que pueden descomponer las membranas y el ADN de los microorganismos presentes en el agua.

Este proceso está compuesto por dos etapas: la primera etapa implica la oxidación del hierro (Fe^{2+}) con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para producir hierro (Fe^{3+}), y la segunda etapa involucra la fotocatalisis con luz ultravioleta (UV). Los contaminantes orgánicos en el agua se descomponen mediante radicales hidroxilo altamente oxidantes que se crean cuando se combinan H_2O_2 y Fe^{3+} .

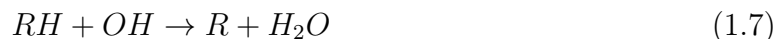
El fenol, los pesticidas, los colorantes, los compuestos aromáticos policíclicos y los compuestos orgánicos volátiles son algunos ejemplos de compuestos contaminantes que se han eliminado mediante el método de foto-Fenton en tratamientos reales de efluentes de aguas residuales de industrias y de agricultura.

El siguiente diagrama se puede utilizar para representar la reacción química general del proceso foto-Fenton:



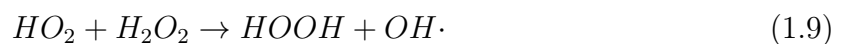
Donde, H_2O_2 representa el peróxido de hidrógeno, Fe^{2+} el hierro en estado reducido y $h\nu$ representa la luz ultravioleta que inicia la reacción. El Fe^{2+} es oxidado por H_2O_2 a Fe^{3+} en esta reacción mientras se expone a la luz ultravioleta. Como resultado de la reacción, se producen radicales hidroxilo altamente oxidantes ($OH \cdot$) y radicales hidroxilo (OH^-), y estos radicales son cruciales para la inactivación de los microorganismos en el agua.

La siguiente reacción química común se puede utilizar para describir cómo se oxidan las moléculas que entran en contacto con los radicales hiroxilo:



Como se observa en la ecuación donde $R \cdot$ es el radical oxidado y RH es el contaminante orgánico.

Además, los radicales hidroxilo también pueden oxidar el H_2O_2 , generando radicales hidroxilo adicionales y oxígeno singlete (1O_2):



El proceso foto-Fenton puede hacerse más efectivo y acelerar la degradación de los contaminantes orgánicos al producir más radicales hidroxilo.

Por último, en el proceso el hierro actúa como catalizador de la reacción por tanto este es capaz de volver a reducirse produciendo más radicales hidroxilo:



En comparación con otros métodos de tratamiento de agua, el proceso de foto-Fenton tiene algunos beneficios, incluida la capacidad de manejar una variedad de contaminantes orgánicos, una alta eficiencia de degradación y una producción mínima de subproductos tóxicos.

Sin embargo, también existen algunos inconvenientes en el proceso de foto-Fenton, como el alto costo de los reactivos y la necesidad de una fuerte luz ultravioleta para iniciar el proceso. Además, la producción de lodos de hierro residual en sí misma puede presentar problemas para la gestión de residuos. Para asegurar la eliminación exitosa de contaminantes orgánicos del agua, es necesaria una cuidadosa optimización del proceso de foto-Fenton.

Una forma de optimizar el proceso de foto-Fenton y en general los procesos con hierro, son los complejantes. Un complejante se conoce como una sustancia que se une a iones en disolución de forma muy selectiva, por lo que le permite trabajar como catalizador a pH mas elevados de su rango normal donde bajaría su rendimiento, haciendo que el fotocatalizador pase a ser una molécula mucho mas grande, un complejo formado por un ion y la molécula complejante. (Suárez, 2018)

1.5.5 Tratamientos con ácidos húmicos

Los ácidos húmicos son compuestos orgánicos intrincados que, encontrados naturalmente en el suelo, el agua y la materia orgánica. Estas sustancias se han empleado en procesos fotoquímicos como catalizadores conjugantes para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua y como agentes para la reducción de la contaminación. Su estructura más común se muestra en la [figura 1.6](#).

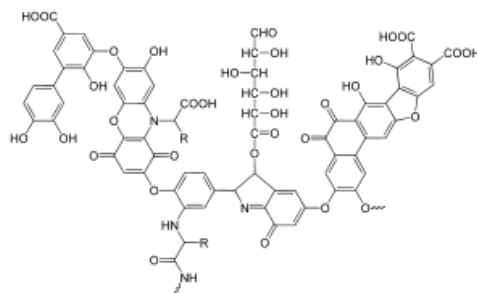


Figura 1.6: Estructura molecular de un ácido húmico

En un tratamiento fotoquímico con ácidos húmicos, la energía de la luz se usa para crear radicales libres que reaccionan con los contaminantes orgánicos en el agua. Al actuar como catalizadores para acelerar la velocidad de reacción de los radicales libres, los ácidos húmicos permiten una eliminación de contaminantes más efectiva. (Martin, 2011)

Los ácidos húmicos también pueden funcionar como agentes reductores en los procedimientos de tratamiento de aguas residuales. Los ácidos húmicos pueden convertir los metales pesados y los contaminantes orgánicos del agua en compuestos menos dañinos durante estos procesos.

Debido a su alta efectividad, los tratamientos fotoquímicos que usan ácidos húmicos se ven como una tecnología prometedora para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua. Para determinar la eficacia de esta tecnología en varios tipos de contaminantes y escenarios de tratamiento, aún se requiere más investigación.

Su alta efectividad en procesos fotoquímicos se debe en gran parte a su capacidad como conjugante de iones como el hierro(III), lo cual forma complejos grandes que mejoran el rendimiento de la desinfección a pH donde foto-Fenton no es viable.

1.6 Eliminación de *Clostridium*

Se denomina *Clostridium* a un grupo de bacterias anaerobias grampositivas que se pueden encontrar en el agua, el suelo y los intestinos de humanos y animales. Si bien algunas especies de *Clostridium*, como las que provocan la producción de ácido láctico durante la fermentación de los alimentos, son saludables para humanos y animales, otras tienen el potencial de ser patógenas y causar enfermedades graves. Dado que algunas especies de *Clostridium* son inmunes a los métodos comunes de desinfección, su presencia en el agua puede representar un riesgo para la salud pública. Debido a esto, se han desarrollado diferentes técnicas para deshacerse de *Clostridium* en el agua. (Organization, 2006a)



Figura 1.7: Colonia de bacterias de *Clostridium Difficile*

Las aguas residuales usadas para riego tenían como parámetro de medida de microorganismos la concentración de *E.Coli*. Según la normativa actual europea 2020/741, las aguas residuales usadas para riego tendrán como parámetro de medida la concentración de *Clostridium*, ya que se trata de una bacteria más peligrosa y más difícil de eliminar de las aguas. Por lo que al eliminar el *Clostridium* también se está eliminando la *E.coli*. (Parliament & of the European Union, 2020)

Clostridium se puede eliminar del agua utilizando una variedad de técnicas, y la mejor técnica a utilizar dependerá de una serie de variables, incluido el tipo y la cantidad de *Clostridium* presente, la fuente del agua y el entorno circundante. Para deshacerse de *Clostridium* y otras bacterias patógenas. (O. T. Rice et al., 2012)

En este contexto, el estudio de la desinfección por *Clostridium* en aguas residuales será el tema principal de este ensayo. Examinaremos los diversos métodos de desinfección disponibles en el mercado y evaluaremos qué tan bien funcionan para eliminar esta bacteria. Además, se discutirán las implicaciones económicas y ambientales de cada técnica y se propondrán soluciones para aumentar la eficacia de la desinfección y reducir los costos asociados.

Debido a las características de estas bacterias, la desinfección de *Clostridium* en aguas residuales presenta una serie de desafíos. Estos desafíos incluyen lo siguiente.

- Resistencia a los desinfectantes: las esporas de *Clostridium* son extremadamente resistentes a muchos desinfectantes comunes, incluidos el cloro y el ozono. Esto implica que el uso de técnicas de desinfección estándar podría no ser suficiente para deshacerse por completo de estas bacterias.
- *Clostridium* puede crear biofilms o biopelículas, que son enclaves bacterianos que se adhieren a las superficies sólidas. Además de proteger contra los desinfectantes, estas biopelículas también dificultan su eliminación.
- Tolerancia al pH: Algunas especies de *Clostridium* no pueden ser eliminadas por desinfección química porque pueden prosperar y proliferar en condiciones de pH extremadamente alcalinas o ácidas.

Se utilizan varios tratamientos para superar estos desafíos y lograr una desinfección efectiva de *Clostridium* en aguas residuales, que pueden incluir:

- Tratamiento biológico: para eliminar *Clostridium* en las aguas residuales, se utilizan procesos biológicos como filtros percoladores y sistemas de lodos activados. A través de la competencia con *Clostridium*, estos sistemas promueven el desarrollo de microorganismos ventajosos que reducen los niveles de *Clostridium*.
- Tratamiento térmico: las esporas de *Clostridium* se pueden eliminar de manera efectiva al someter las aguas residuales a procedimientos de esterilización o pasteurización que las exponen a altas temperaturas. Sin embargo, estas técnicas pueden consumir mucha energía y requieren un control cuidadoso de la temperatura.

- Tratamiento con luz ultravioleta: los rayos ultravioleta pueden inactivar las células de *Clostridium* y reducir su concentración en las aguas residuales. La dosis de radiación utilizada y la duración de la exposición determinan qué tan bien funciona este método.
- Tratamiento con Peróxido de Hidrógeno: Por ser un potente oxidante, el peróxido de hidrógeno se puede utilizar para desinfectar aguas residuales y eliminar *Clostridium*. Sin embargo, para prevenir efectos secundarios negativos, su uso requiere una cuidadosa atención a la concentración y el tiempo de contacto. Esta es la más eficiente y la más usada.

Es crucial recordar que la desinfección de *Clostridium* en aguas residuales presenta un desafío constante porque estas bacterias pueden mostrar resistencia y adaptarse a los tratamientos utilizados. Como resultado, es crucial implementar una estrategia integral que combine varias opciones de tratamiento con un control regular para garantizar una desinfección eficaz.

2 Objetivo

2.0.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo de final de grado es contribuir al conocimiento actual sobre la desinfección de aguas residuales y proporcionar información útil para la mejora de los sistemas de tratamiento terciario de aguas residuales en la eliminación del *Clostridium* y otros microorganismos patógenos.

2.0.2 Objetivos específicos

- Calcular el tiempo de residencia necesario para realizar correctamente la desinfección en continuo.
- Diseñar un sistema industrial de desinfección de *Clostridium* que se asemeje a los valores con los que se trabaja en una EDAR.
- Estudiar la viabilidad económica que supone el proceso de desinfección que se estudia a nivel industrial y calcular el coste por metro cúbico del agua tratada en estas condiciones.
- Aplicar los resultados obtenidos del proceso en discontinuo a un proceso en continuo y estudiar otros factores que afecten al proceso, como es por ejemplo el caudal, que está íntimamente ligado con el tiempo de residencia.
- Comprobar la eficiencia de procesos tipo Fenton en la eliminación de *Clostridium spp* a pH natural.

A continuación, se presentan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Algunos de estos objetivos y cómo se aplican al trabajo de desinfección de *Clostridium* se enumeran a continuación.

ODS 3: Salud y bienestar: El objetivo principal de la desinfección con *Clostridium* es salvaguardar la salud humana eliminando o controlando la presencia de esta bacteria. Se promueve el bienestar y se disminuyen los efectos perjudiciales sobre la salud de las personas tomando medidas eficaces para prevenir y combatir la infección por *Clostridium*.

ODS 6: Saneamiento y agua limpia: *Clostridium* se puede encontrar en aguas contaminadas y entornos insalubres. Los riesgos de contaminación y propagación de enfermedades disminuyen con la desinfección porque contribuye a la provisión de agua limpia y saneamiento adecuado.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: La desinfección con *Clostridium* es particularmente importante en entornos urbanos y comunidades con alta densidad de población. Puedes ayudar a crear entornos más seguros y saludables, fomentar la sostenibilidad y mejorar la calidad de vida de las personas al contener y prevenir la propagación de esta bacteria.

Para combatir eficazmente la contaminación por *Clostridium*, es fundamental utilizar técnicas y productos de desinfección seguros y respetuosos con el medio ambiente. Esto está en línea con el ODS 12: Obtener y consumir mis recursos de manera responsable. Para reducir los efectos negativos del proceso de desinfección sobre el medio ambiente, se requieren prácticas responsables y el uso de químicos biodegradables.

ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos: La lucha contra *Clostridium* requiere la colaboración y cooperación entre numerosos actores, incluidos profesionales de la salud, autoridades sanitarias, investigadores y la comunidad en general. Para abordar de manera efectiva este problema, se requieren alianzas y trabajo en equipo.

3 Procedimiento experimental

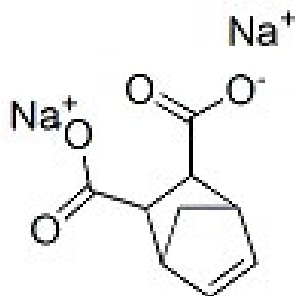
En este capítulo se encuentra el procedimiento experimental llevado a cabo en el laboratorio para analizar diferentes métodos de desinfección de Clostridium y optimizar el proceso hasta obtener los mejores resultados.

3.1 Reactivos

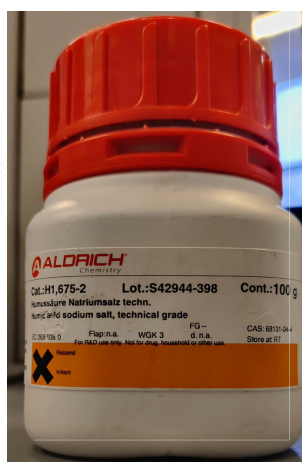
3.1.1 Ácidos húmicos

Nombre del reactivo	Ácidos Húmicos sal sódica
Proveedor	Sigma Aldrich Chemistry
Formula	$C_9H_8Na_2O_4$
CAS	68131-04-4
CE	268-606-0
Peso molecular	226,14g/mol
Pureza	60 %

Tabla 3.1: Propiedades de los Ácidos húmicos usados



(a) Fórmula molecular



(b) Imagen de la sal disódica del ácido húmico empleado

Figura 3.1: Sal disódica del ácido húmico

3.1.2 Sulfato de hierro(II) heptahidratado

Nombre del reactivo	Sulfato de hierro(II) heptahidratado
Proveedor	Panreac AppliChem ITW
Formula	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
CAS	7782-93-0
CE	231-753-5
Peso molecular	278,02g/mol
Pureza	99,5%

Tabla 3.2: Propiedades del $FeSO_4$ usado

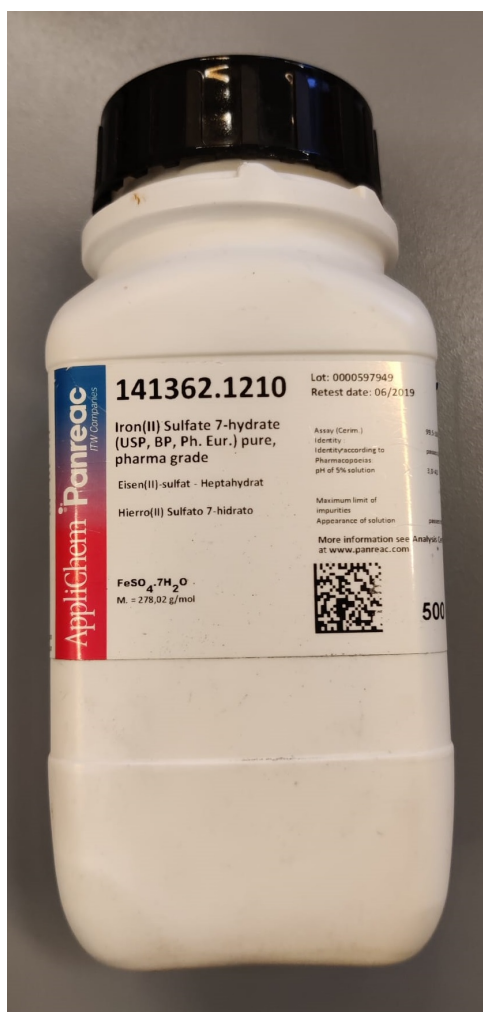
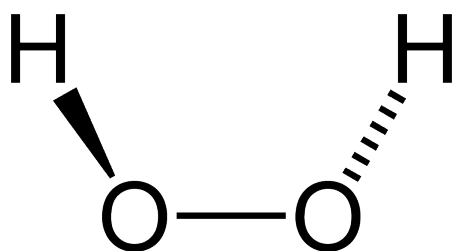


Figura 3.2: Imagen del $FeSO_4$ empleado

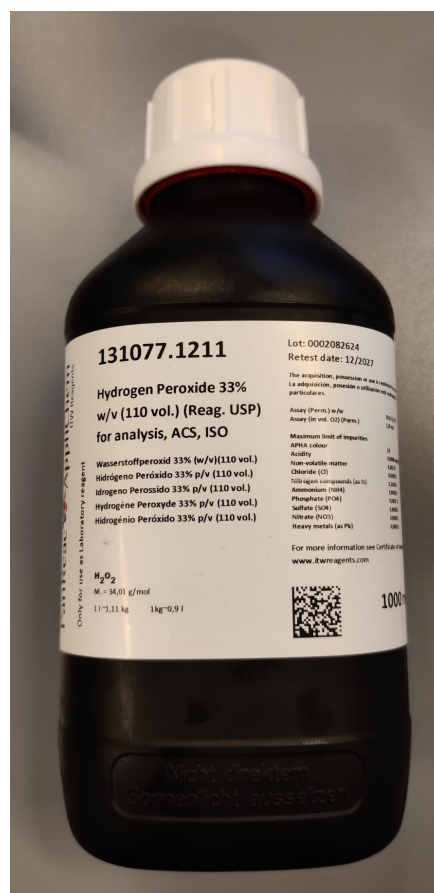
3.1.3 Peróxido de hidrógeno

Nombre del reactivo	Peróxido de hidrógeno
Proveedor	Panreac AppliChem ITW
Formula	H_2O_2
CAS	7722-84-1
CE	231-765-0
Peso molecular	34,0147g/mol
Pureza	60 %

Tabla 3.3: Propiedades del H_2O_2 usado



(a) Fórmula molecular



(b) Imagen del peróxido de hidrógeno empleado

Figura 3.3: Peróxido de hidrógeno

3.1.4 *Catalasa*

Nombre del reactivo	Catalasa
Proveedor	Sigma Aldrich Chemistry
Procedencia	Higado Bovino
CAS	9001-05-2
CE	-
Peso molecular	210 – 280kD
Pureza	99 %

Tabla 3.4: Propiedades de la *Catalasa* usada

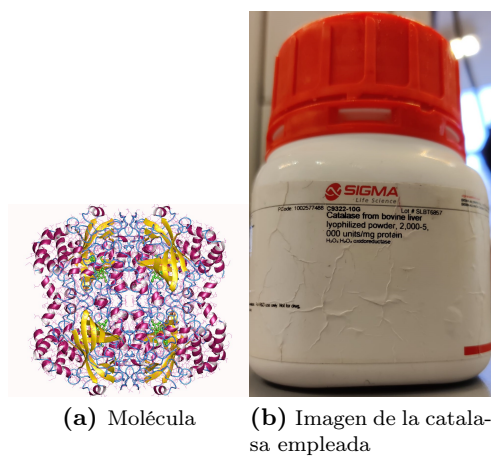


Figura 3.4: Catalasa

3.1.5 *Agua destilada*

El agua destilada se utiliza para diluir el contenido de agua tratada para poder filtrarla y para realizar la disolución de catalasa.

Para la obtención del agua destilada se ha usado el equipo disponible en el laboratorio.



Figura 3.5: Equipo de obtención del agua destilada

3.1.6 Agua de EDAR Alcoy

El agua que se desea tratar proviene de la EDAR de la ciudad de Alcoy y se toma tras la salida del tratamiento secundario, después de la captación del agua se realiza su caracterización en el laboratorio y se obtienen los parámetros de pH, conductividad, turbidez el TOC y el oxígeno disuelto. Estos se expresan en la [tabla 3.5](#), mostrada a continuación:

Proveedor	EDAR Alcoy
pH	7.48
Conductividad ($\mu S/cm$)	3600
Turbidez (FNU)	1.78
TOC (ppm)	21.14
DQO(mg/L)	<10

Tabla 3.5: Características del agua usada

3.2 Material

1. Simulador solar

Proveedor	Oriel Instruments
Potencia	450 W
Numero de modelo	81160-1000
Irradiancia	32 W/m^2

Tabla 3.6: Características del simulador solar



Figura 3.6: Simulador solar

2. Reactor

Proveedor	Vicilab
Altura	7cm
Diámetro	10cm
Volumen	549,78ml

Tabla 3.7: Caption



Figura 3.7: Reactor

3. Filtro de luz

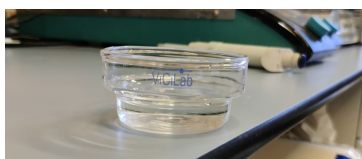


Figura 3.8: Filtro de luz

4. Agitador



Figura 3.9: Agitador

5. Filtro de membrana

Proveedor	Membrane Solution
Porosidad	0,45 μm
Material	Celulosa

Tabla 3.8: Características de los filtros de membrana



Figura 3.10: Filtro de membrana

6. Autoclave

El Autoclave utilizado en la desinfección del material para el filtrado por medio de vapor de agua es de la empresa J.P. Selecta.



Figura 3.11: Autoclave

7. Material de autoclave



Figura 3.12: Material de autoclave

8. Rampa de filtración



Figura 3.13: Rampa de filtrado

9. Balanza de precisión



Figura 3.14: Balanza de precisión

10. Incubadora



Figura 3.15: Incubadora

11. Bomba

Proveedor	EBM Papst
Potencia (kW)	0.18
Tensión (V)	230 ± 10 %

Tabla 3.9: Características de la bomba



Figura 3.16: Bomba

12. Campana de seguridad biológica



Figura 3.17: Cámara de seguridad biológica

13. Material de laboratorio (matraces aforados, vidrio de reloj, embudo, probetas, vasos de precipitados)



Figura 3.18: Material de laboratorio

14. Placas Petri de con medio cultivo



Figura 3.19: Placa Petri con medio de cultivo

15. Pinzas



Figura 3.20: Pinzas

16. Bolsa anaeróbica

Los microbiólogos utilizan el sistema de bolsa anaeróbica, también llamado sistema de cultivo de bolsa anaeróbica (*Anaerobe pouch system*), para cultivar y mantener microorganismos que necesitan un entorno con poco o nada de oxígeno. En un ambiente controlado, este sistema permite la incubación y crecimiento de bacterias y otros microorganismos anaerobios.



Figura 3.21: Anaerobe pouch system

El sistema de bolsa anaeróbica consiste en una bolsa de plástico hermética que contiene un medio de cultivo ideal para el crecimiento de microorganismos anaeróbicos. Se crea un ambiente anaeróbico dentro de la bolsa por una combinación de gases que excluyen el oxígeno. Los gases más utilizados son una mezcla de nitrógeno, dióxido de carbono e hidrógeno.

3.3 Procedimiento realizado

Para la realización de este trabajo y comprobar la capacidad de mejora de procesos fotoquímicos mediante el uso de ácidos húmicos, se ha procedido de la manera siguiente:

Se han realizado una serie de experimentos variando el contenido de la disolución de agua a tratar y el tiempo de exposición a la luz.

Las disoluciones de agua a tratar contienen reactivos en los se aplica la teoría del proceso de foto fenton, tratamiento con peróxido de hidrógeno y la supuesta capacidad de mejora de rendimiento que aportan los ácidos húmicos.

Se realizaron los experimentos en el simulador solar con un intervalo de exposición de una hora hasta las tres horas como máximo, tomando como muestra inicial la disolución preparada sin exponer a la luz.

Esto se hace para obtener una evolución temporal de la desinfección del *Clostridium*.

3.3.1 Procedimiento en laboratorio

El procedimiento realizado en el laboratorio se divide en cuatro partes.

1. Preparación de la disolución

En el apartado de preparación, se deben tomar 100 *ml* de agua de EDAR a la salida del tratamiento secundario explicado en la [sección 1.3](#).

Seguidamente se realiza la disolución correspondiente según las combinaciones siguientes, se atribuirá a cada combinación un valor del 1 al 8 para facilitar las explicaciones:

- Agua de EDAR (1)
- Agua de EDAR + AH (2)
- Agua de EDAR + H_2O_2 (3)
- Agua de EDAR + H_2O_2 + AH (4)
- Agua de EDAR + Fe(II) + H_2O_2 (5)
- Agua de EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH (6)
- Agua de EDAR + Fe(II) (7)
- Agua de EDAR + Fe(II) + AH (8)

Las concentraciones de los reactivos utilizados en cada disolución son:

$$[H_2O_2] = 50 \mu\text{L}$$

$$[Fe(II)] = 5 \text{ mg/L}$$

$$[AH] = 10 \text{ mg/L}$$

2. Irradiación

Tras preparar la disolución correspondiente se, se procede a la irradiación de luz con el simulador solar presentado. En la siguiente imagen se muestra cómo debe verse el proceso:



Figura 3.22: Proceso de irradiación

Se debe obtener de cada disolución cuatro experimentos, la muestra inicial, a tiempo 0, la muestra con una hora de radiación, la muestra con 2 horas de radiación y por último, la de 3 horas de irradiación.

Tras la finalización del proceso, se debe guardar la disolución tapada hasta que se pueda continuar con el siguiente paso.

En el caso de que se haya usado peróxido de hidrógeno en el proceso se deberá inhibir mediante la adición de 50 *ml* de una disolución de catalasa a concentración 0.5 *g/L*

3. Filtración

Tras finalizar el proceso de irradiación se debe llevar la disolución al proceso de filtrado donde se utiliza la rampa de filtrado en para filtrar a distintos factores de dilución.

Estos factores dependen del tiempo de exposición a la luz debido a que al no irradiar durante el tiempo suficiente las disoluciones no se elimina mucho *Clostridium* y sería imposible contar grandes cantidades de colonias, es decir, cuanta más radiación haya recibido la disolución, menos se deberá diluir a la hora de filtrar.

Las diluciones usadas para cada tiempo son:

Tiempo de radiación (<i>min</i>)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	1:500	1:100	1:50
60	1:100	1:100	1:50
120	50:100	10:100	10:100
180	50:100	10:100	10:100

Tabla 3.10: Tabla de disoluciones usadas en el filtrado

Al haber realizado las disoluciones se procede a la colocación del material de autoclave, previamente lavado y desinfectado en el autoclave a 121o, y a colocar los filtros de membrana. A continuación, se procede a abrir las válvulas y a encender la bomba para empezar el filtrado.



Figura 3.23: Montaje del proceso de filtrado

Si no se consigue filtrar todo el contenido se deberá anotar para finalmente tener en cuenta los *ml* reales que se han conseguido filtrar para tenerlo en cuenta en los cálculos.

Tras filtrar todo el contenido, se debe llevar los filtros uno a uno a la cámara de seguridad biológica, previamente desinfectada con luz UV, y colocarlos cara a bajo en las placas Petri con el medio de cultivo. Por último, se sellarán con Parafilm, se caracterizará para que la distinción entre diluciones sea más clara, por ejemplo, escribiendo en la cara superior, y se introducirán en una bolsa de plástico con sellado hermético con el indicador anaerobio para crear el ambiente interior. Para utilizar el sistema de bolsa anaeróbica, se inocula una muestra que contiene microorganismos anaeróbicos en el medio de cultivo dentro de la bolsa. Luego se aplica un sello hermético.

La falta de oxígeno del sistema de bolsa anaeróbica fomentará el crecimiento de bacterias anaeróbicas y otros microorganismos que no pueden sobrevivir en un ambiente rico en oxígeno. Debido a que el *Clostridium* es un microorganismo anaerobio tras completar todos los pasos este podrá reproducirse de forma correcta.

4. Incubación

En la parte final de todo el proceso se procede a tomar la bolsa con las tres muestras y se introduce en la incubadora a 44° y se deja incubar durante 24h ± 1h.

3.3.2 Recuento de colonias de *Clostridium*

Finalmente, al terminar el periodo de incubación se retiró la bolsa hermética cerrada hasta la cámara de extracción previamente desinfectada con luz UV. Una vez dentro se toma de cada muestra y se realiza un recuento de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de *Clostridium*, que se observan como puntos negros por la cara inferior de las placas Petri.

El recuento se hace sin tener en cuenta el tamaño de las colonias. Si se observa un punto por pequeño que sea se contara como colonia.

Se muestra unos ejemplos de los resultados obtenidos para mostrar cómo debería verse:

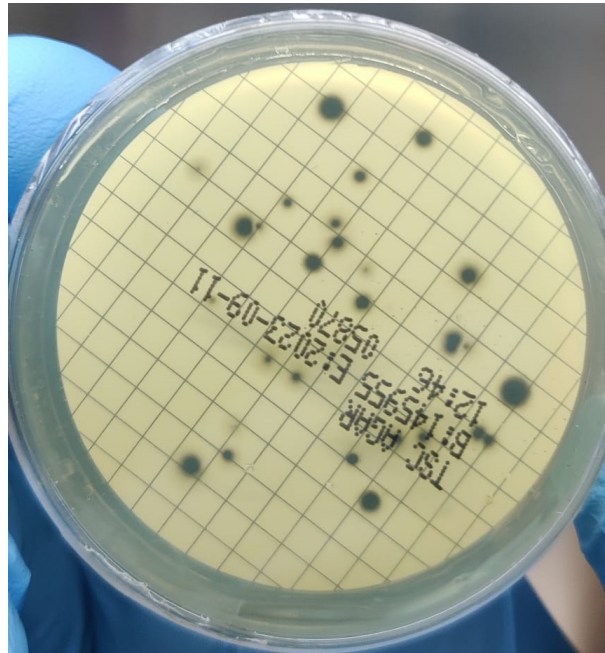


Figura 3.24: Ejemplo de cultivo de *Clostridium* obtenido

4 Análisis de datos

En este capítulo se encuentra el procedimiento utilizado para la obtención de los resultados gráficos a partir de los valores contados en el laboratorio y explicados en el apartado anterior.

4.1 Interpretación de los resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos, tras realizar el procedimiento explicado en la [sección 3.3](#), se constituyen de un conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de *Clostridium* caracterizadas por:

1. Tipo de tratamiento aplicado
2. Tiempo de irradiación
3. Dilución aplicada en el proceso de filtrado

Sabido esto se pasa a presentar una de las gráficas obtenidas de uno de los experimentos como muestra de cómo han sido tratados estos datos para la obtención de las tablas finales del [Capítulo 5](#):

Tiempo (h)	Dilución	Puntos negros (UFC)
0	1:500	1
0	1:100	7
0	1:50	16
1	1:100	4
1	1:100	5
1	1:50	9
2	10:100	8
2	10:100	7
2	50:100	25
3	50:100	5
3	10:100	2
3	10:100	3

Tabla 4.1: Resultados obtenidos en las condiciones 5 (1)

El primer paso aplicado para la representación de los datos consiste en obtener el valor de $\frac{UFC}{150ml}$ de disolución, ya que el volumen de agua tratada al final de cada experimento varía entre 100 o 150 ml dependiendo de si se ha usado la catalasa o no. Entonces se debe hacer la conversión de $\frac{UFC}{150ml}$ a todos los experimentos. La tabla de ejemplo contiene los datos donde se ha usado catalasa por tanto se debe obtener el valor de UFC/100 ml.

$$\frac{UFC}{100ml} = \frac{UFC}{150ml} \cdot \frac{100}{150} \quad (4.1)$$

En el caso de que no se pueda completar la filtración comentada en [sección 3.3](#) y aun quede disolución por filtrar:

$$\frac{UFC}{100ml} = \frac{UFC}{150ml} \cdot \frac{100}{150} \cdot \frac{100}{ml \text{ filtrados de la disolucion}} \quad (4.2)$$

Esto puede ocurrir debido a que la disolución es demasiado turbia y se ha alcanzado el límite del filtro y se encuentre totalmente saturado, o que la bomba no alcanza suficiente potencia.

Seguidamente se debe multiplicar cada valor de $\frac{UFC}{100ml}$ de disolución por el factor de dilución aplicado. Teniendo en cuenta que los valores apuntados como factor de dilución son proporciones de agua tratada y agua destilada respectivamente y el factor a multiplicar sera la relación entre los volúmenes de cada uno al hacer la dilución.

Tiempo (h)	Dilución	Puntos negros	$\frac{UFC}{100ml}$	$\frac{UFC}{100ml} \cdot \text{FD}$
0	1:500	1	1	500
0	1:100	7	7	700
0	1:50	16	16	800
1	1:100	4	2.67	266.67
1	1:100	5	3.33	333.33
1	1:50	9	6	300
2	10:100	8	5.33	53.33
2	10:100	7	4.67	46.67
2	50:100	25	16.67	33.33
3	50:100	5	3.33	12.35
3	10:100	2	1.33	13.33
3	10:100	3	2.00	20.00

Tabla 4.2: Resultados obtenidos en las condiciones 5 (2)

Estos valores obtenidos representan las unidades formadoras de colonias que se encuentran en toda la muestra tratada en cada instante de tiempo y en cada muestra, lo que implica que la muestra inicial aportará los valores que representan la cantidad máxima de UFC presente en el agua a tratar. Dividiendo cada valor obtenido entre el promedio de todos los valores de la muestra inicial se obtendría la concentración relativa de *Clostridium* en cada muestra.

$$C_r\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{\frac{UFC}{150ml}}{\text{Promedio}\left(\frac{UFC}{100ml}\right)} \quad (4.3)$$

A continuación, sabiendo la concentración relativa de *Clostridium* de cada muestra, restando a la unidad el valor obtenido como concentración relativa se obtiene el porcentaje de eliminación alcanzado en cada muestra.

$$\%Eliminacion = 1 - C_r \quad (4.4)$$

UFC/100 mL · FD	Concentración relativa	Porcentaje de eliminación
500	1	0
700	1	0
800	1	0
266.67	0.4	0.6
333.33	0.5	0.5
300	0.45	0.55
53.33	0.08	0.92
46.67	0.07	0.93
33.33	0.05	0.95
12.35	0.019	0.98
13.33	0.02	0.98
20	0.03	0.97

Tabla 4.3: Resultados obtenidos en las condiciones 5 (3)

Debido a la naturaleza exponencial del crecimiento bacteriano y los procesos de muerte, la escala logarítmica se usa con frecuencia en el contexto de la microbiología y la muerte bacteriana. Las cifras pueden variar ampliamente y abarcar varios órdenes de magnitud cuando se examinan las tasas de eliminación de bacterias, incluido *Clostridium*. (Bintsis, 2017)

Estos datos se pueden visualizar y analizar de una manera más clara gracias a la escala logarítmica. Los resultados se pueden entender más fácilmente al graficar los datos en una escala logarítmica, que puede representar cambios muy grandes y pequeños en un rango más manejable. Además, el trazado logarítmico puede ayudar a llamar la atención sobre variaciones mínimas en las tasas de eliminación y mostrar patrones y tendencias con mayor claridad. (Bintsis, 2017)

Por ello, para representar los resultados se calcula el valor del logaritmo en base 10 de la concentración relativa en cada muestra.

Tiempo (h)	Concentración relativa	$\log(C/C_0)$
0	1	0
0	1	0
0	1	0
1	0.4	-0.40
1	0.5	-0.30
1	0.45	-0.35
2	0.08	-1.10
2	0.07	-1.15
2	0.05	-1.30
3	0.018518519	-1.73
3	0.02	-1.70
3	0.03	-1.52

Tabla 4.4: Resultados obtenidos en las condiciones 5 (4)

Esta [tabla 4.4](#) abarca los resultados obtenidos con con todas las muestras.

Para poder usar todos los resultados se realiza el promedio de todas las muestras a cada tiempo de irradiación y su desviación estándar para observar la variación entre los tres datos.

Tiempo (h)	Promedio $\log(C_r)$	Desviación
0	0.00	0 %
1	-0.35	5 %
2	-1.18	11 %
3	-1.65	9 %

Tabla 4.5: Resultados obtenidos en las condiciones 5 (5)

Debido a que las desviaciones son lo suficientemente bajas se toma como que los resultados son fiables. Si no lo fuesen, se debería repetir el proceso desde el principio ([Capítulo 3](#)) hasta obtener resultados coherentes, o por otro lado, cuestionarse el por qué se obtienen desviaciones más altas.

5 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se han interpretado en como se explica en el [Capítulo 4](#) para observar la evolución que respecta a la concentración de *Clostridium* en el agua en función del tiempo de irradiación a la luz. También se puede observar la desviación estándar obtenida entre muestras. Todos los experimentos se han realizado en discontinuo.

5.1 Eliminación de *Clostridium* respecto al tiempo

5.1.1 EDAR(1)

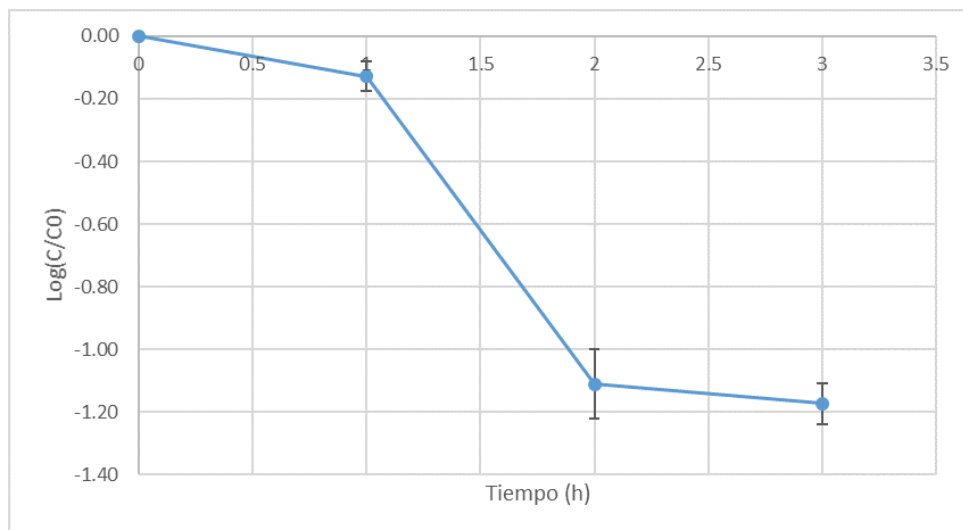


Figura 5.1: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR

En la [figura 5.1](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* únicamente aplicando la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso SODIS en y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 91-94% del *Clostridium* presente en la primera muestra.

5.1.2 EDAR + AH(2)

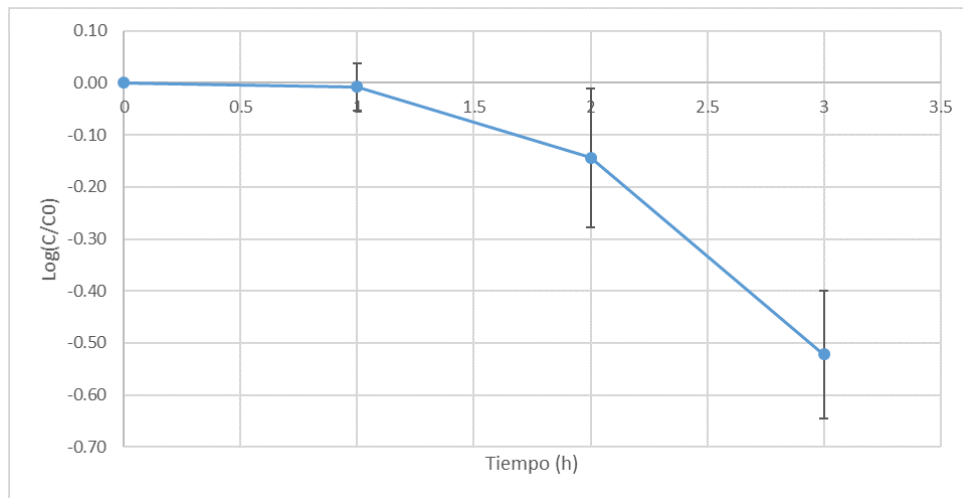


Figura 5.2: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + AH

En la [figura 5.2](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando ácidos húmicos y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso de SODIS en y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 62-79% del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En comparación con el resultado anterior se observa el empeoramiento del rendimiento, esto puede deberse a que los ácidos húmicos no presentan ningún tipo de actividad fotocatalítica por lo que no aportan nada a la desinfección. Y no solo eso sino que a parte también absorben fotones que podrían desinfectar haciendo un efecto de pantalla por lo que el rendimiento baja.

5.1.3 EDAR + Fe(II)(3)

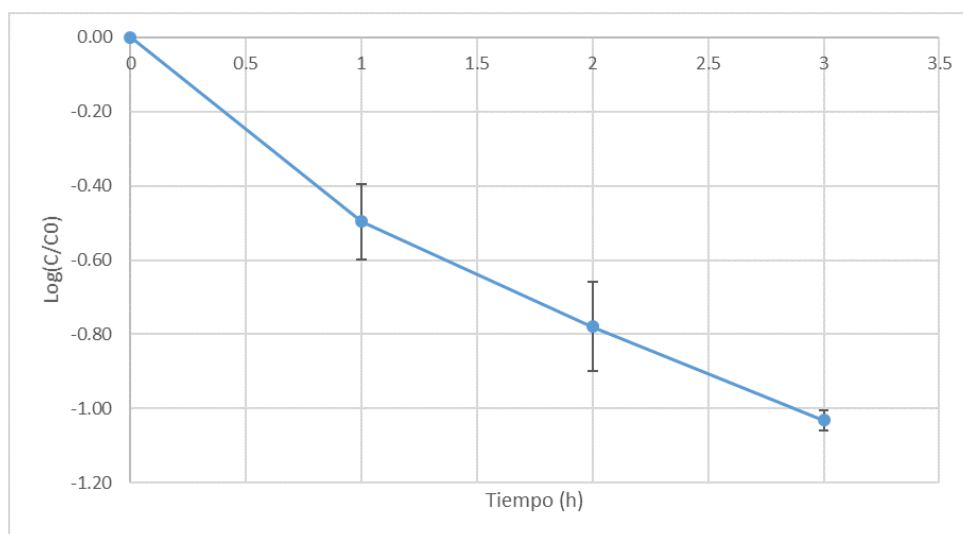


Figura 5.3: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II)

En la [figura 5.3](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando el ion hierro(II) y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso SODIS en y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 90-91 % del *Clostridium* presente en la primera muestra.

Estos resultados se deben a que el hierro no solo no actúa como fotocatalizador a pH neutro, si no que también puede absorber un poco de luz, haciendo de pantalla con el objetivo a desinfectar.

5.1.4 EDAR + Fe(II) + AH(4)

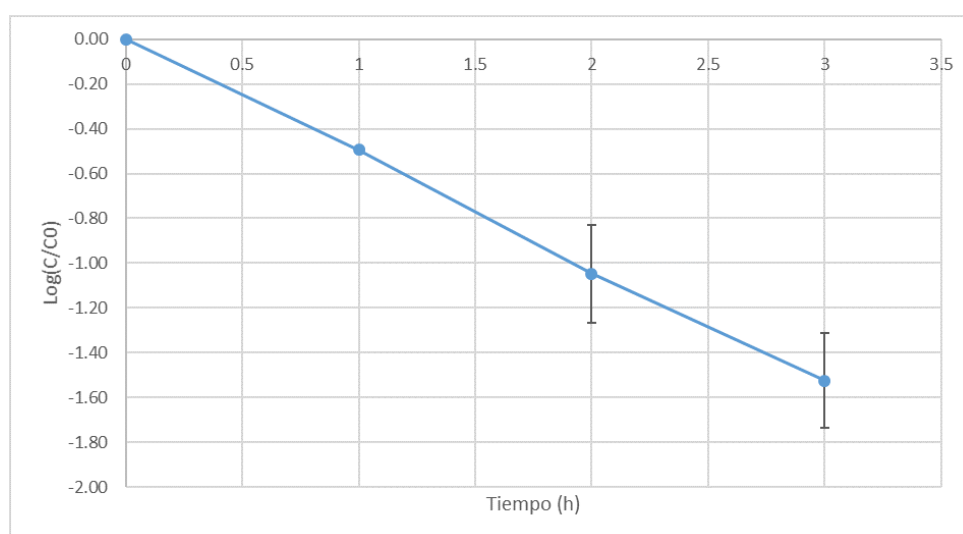


Figura 5.4: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) + AH

En la [figura 5.4](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando el ion hierro(II), ácidos húmicos y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso desinfección fotoquímica y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 95-98 % del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En este caso, se puede observar una mejora con respecto a los resultados obtenidos anteriores. puede que los ácidos húmicos formen un complejo fotoactivo que ayude a la desinfección del proceso.

5.1.5 EDAR + Fe(II) + H₂O₂(5)

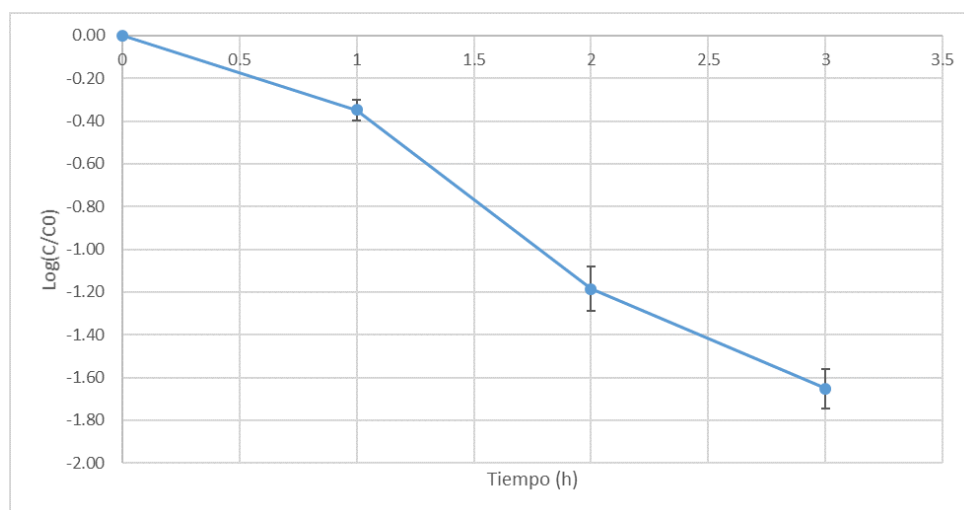


Figura 5.5: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) + H₂O₂

En la [figura 5.5](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando el ion hierro(II), peróxido de hidrógeno y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso desinfección fotoquímica avanzado y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 97-98 % del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En este caso se observa un proceso de foto-Fenton, en el se observa que es ligeramente mejor a los anteriores, pero no mucho mas debido a que el hierro no sera muy activo en el pH de trabajo.

5.1.6 EDAR + Fe(II) + H₂O₂ + AH(6)

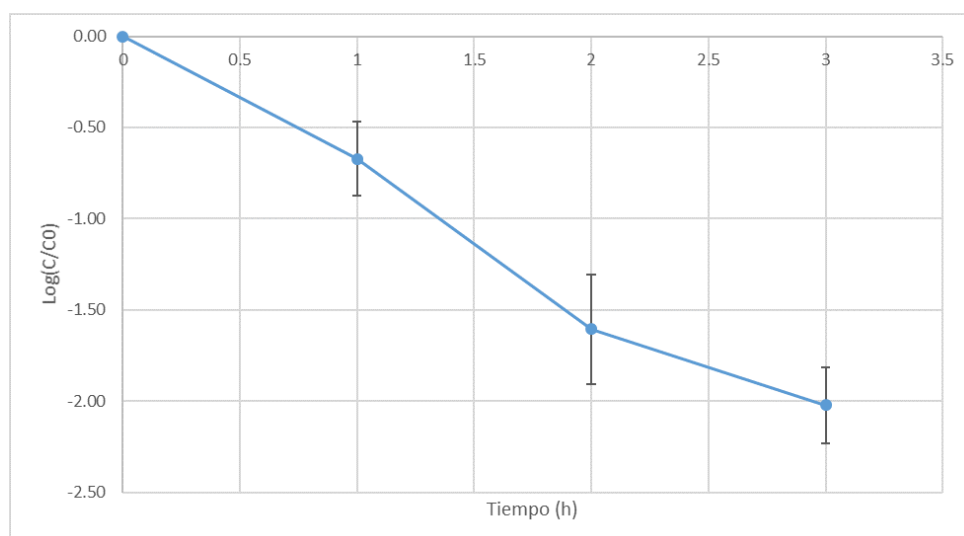


Figura 5.6: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) + H₂O₂ + AH

En la [figura 5.6](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando el ion hierro(II), peróxido de hidrógeno, los ácidos húmicos y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso desinfección fotoquímica avanzado en y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 99.0-99.5 % del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En este resultado se puede observar que la formación de complejos fotoactivos mejora el rendimiento del proceso foto-Fenton.

5.1.7 EDAR + H_2O_2 (7)

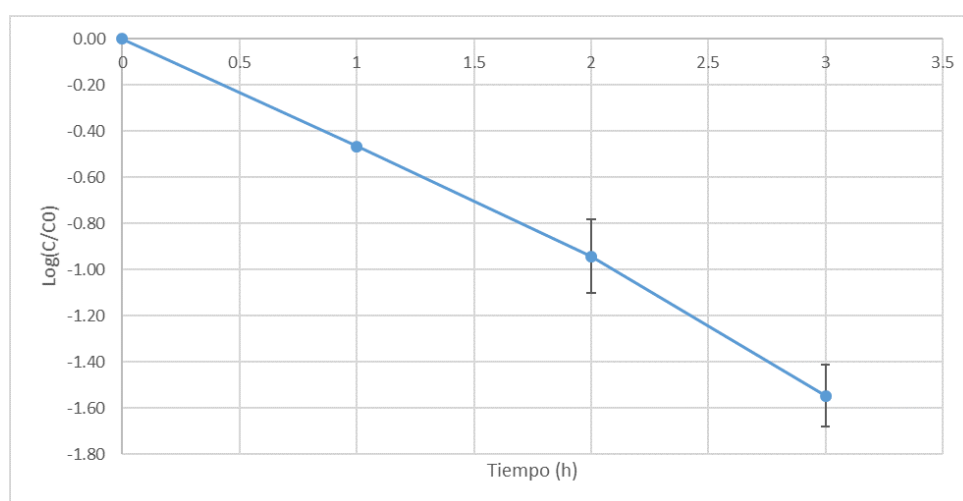


Figura 5.7: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + H_2O_2

En la [figura 5.7](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando peróxido de hidrógeno y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso desinfección y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 96-98 % del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En estos resultados se puede observar un buen resultado pese a que las condiciones del experimento no favorecen que esta desinfección haya sido fotoquímica, porque para que ocurra la fotólisis del peróxido de hidrógeno se debe irradiar a menos de 300nm. Pese a que se este irradiando la disolución, no debe haber una radiación tan baja como esa, por lo que esta actuando el H₂O₂ como oxidante pese a que sea menos eficiente.

5.1.8 EDAR + H_2O_2 + AH(8)

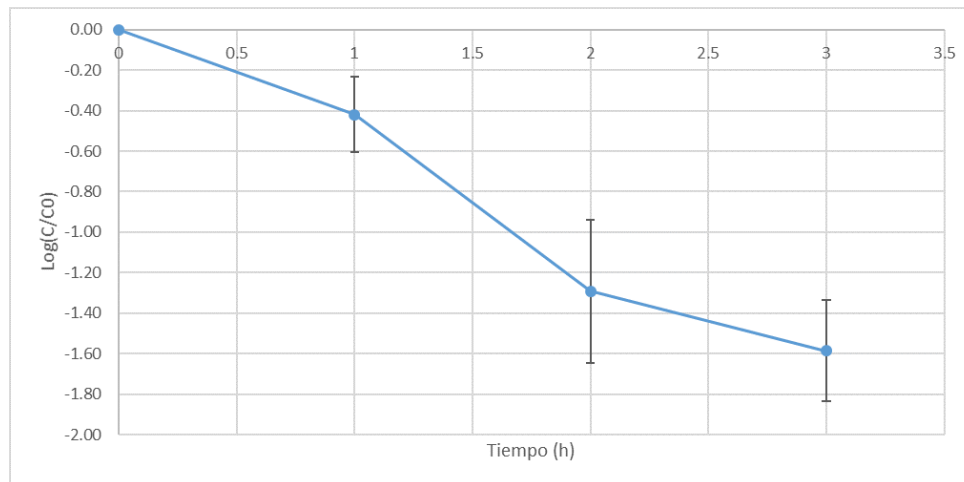


Figura 5.8: Eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + H_2O_2 +AH

En la [figura 5.6](#) se obtiene la eliminación del *Clostridium* aplicando peróxido de hidrógeno, los ácidos húmicos y la irradiación de la luz solar al agua obtenida de la salida del secundario de la EDAR de Alcoy. Este se considera un proceso desinfección y se observa que se ha conseguido eliminar entre un 95-99% del *Clostridium* presente en la primera muestra.

En el último experimento se puede observar que puede haber sucedido lo mismo que en el anterior experimento pero también contando con el efecto de apantallamiento de los ácidos húmicos.

5.2 Comparación de resultados

En este apartado se compararán los resultados obtenidos para determinar la acción realizada por parte de los Ácidos Húmicos en la desinfección de *Clostridium*.

5.2.1 Comparación EDAR (1) - EDAR + AH (2)

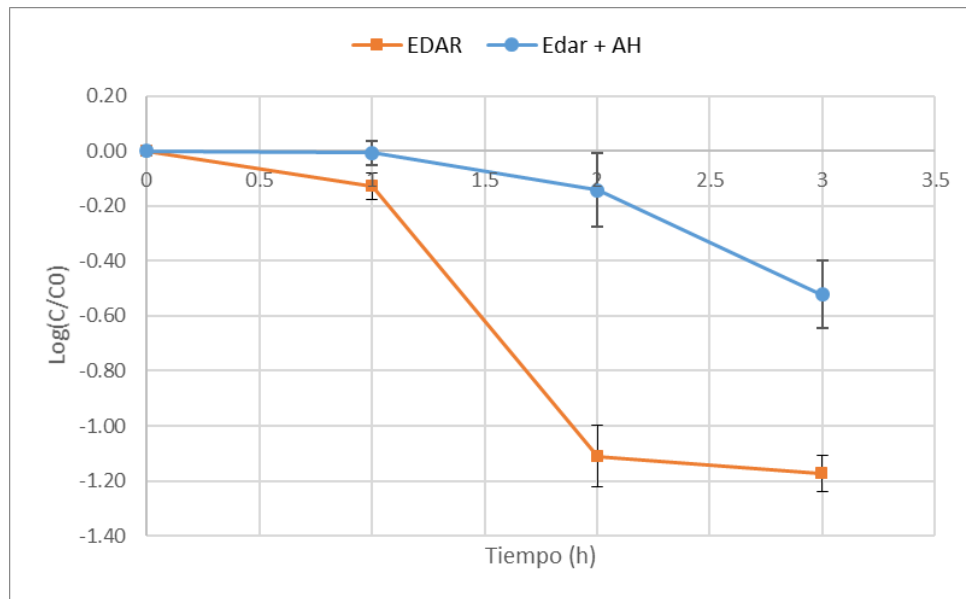


Figura 5.9: Comparación de eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR y con Agua EDAR + AH

En la [figura 5.9](#) se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la desinfección del agua de EDAR. Se puede observar como el proceso sin ácidos húmicos alcanza una mejor eliminación de *Clostridium* que en el proceso con ácidos húmicos.

Esto se debe a que, los ácidos húmicos disueltos en el agua de EDAR oscurecen la disolución y los que están en estado dispersos la enturbian. Por lo que, como se ha comentado en la [subsección 1.5.1](#), la turbidez del agua es un factor determinante para el rendimiento de los procesos con luz solar debido a que los fotones no son capaces penetrar correctamente la disolución y eliminar los microorganismos pertinentes.

Otra explicación es que, este comportamiento puede significar que los ácidos húmicos no tengan ninguna actividad fotocatalítica apreciable por sí mismos.

5.2.2 Comparación EDAR + Fe(II) (3) - EDAR + Fe(II) + AH (4)

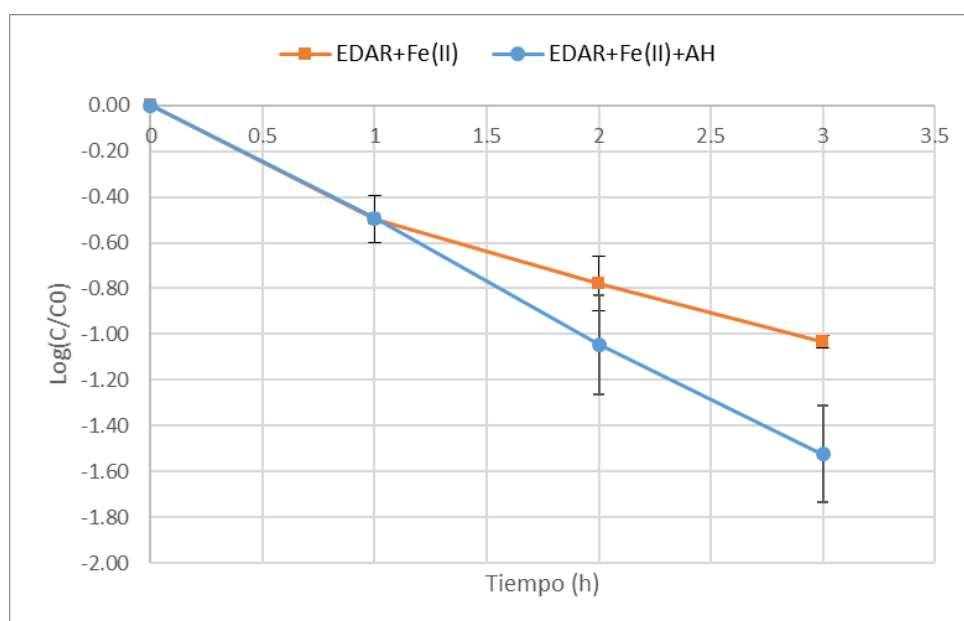


Figura 5.10: Comparación de eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) y con Agua EDAR + Fe(II) + AH

El la [figura 5.10](#) se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la desinfección del agua de EDAR con Fe(II). Se puede observar como el proceso con ácidos húmicos alcanza una mejor eliminación de *Clostridium* que en el proceso sin ácidos húmicos.

Esto se debe a que, el hierro no es capaz de trabajar eficazmente a pH superiores a de 3.2 y los ácidos húmicos es una molécula más compleja y grande, que a su vez, es complejante del hierro. En concreto este sera complejante del hierro(III) debido a que sera el ion predominante en la disolución, debido a que oxidar el hierro(II) a hierro(III) a pH neutro en sencillo solo con el oxígeno disuelto. Añadiendo peróxido de hidrógeno al proceso esta oxidación a hierro(III) es prácticamente instantánea.

5.2.3 Comparación EDAR + Fe(II) + H₂O₂(5) – EDAR + Fe(II) + H₂O₂ + AH(6)

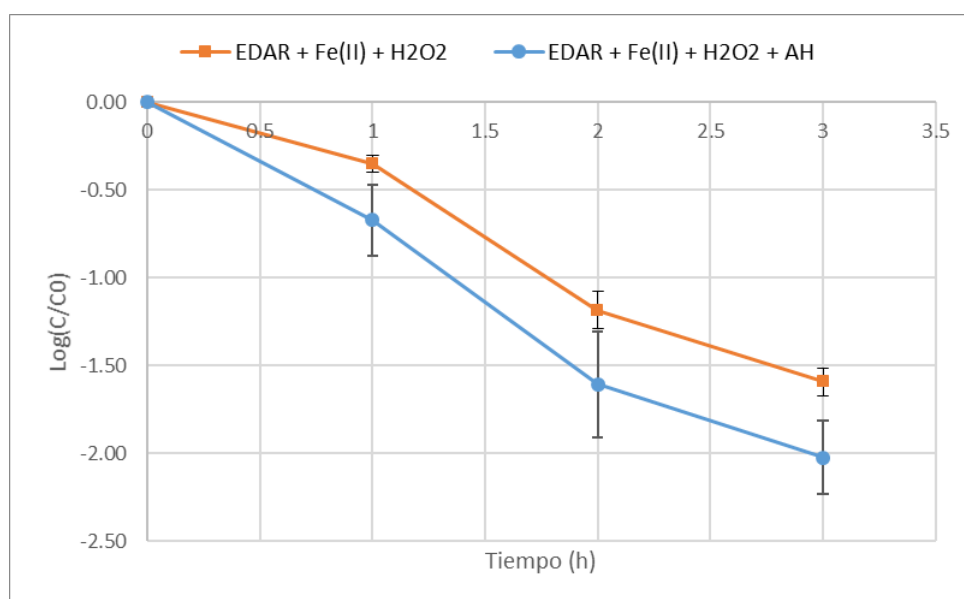


Figura 5.11: Comparación de eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) + H₂O₂ y con Agua EDAR + Fe(II) + H₂O₂ + AH

En la figura 5.11 se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la desinfección del agua de EDAR con Fe(II) y H₂O₂. Se puede observar como el proceso con ácidos húmicos alcanza una mejor eliminación de *Clostridium* que en el proceso sin ácidos húmicos y además alcanzar el máximo porcentaje de eliminación de todos los resultados.

Esto se debe a que, como se ha hablado antes, los ácidos húmicos mejoran el rendimiento del hierro como catalizador en aguas con pH más elevados debido a que se une a los iones disueltos creando complejos de hierro.

Se puede observar su mejora del rendimiento haciendo que se elimine hasta un 2% más de *Clostridium* que sin los ácidos húmicos. Esta mejora pese a notarse gráficamente no es tan significativa como para invertir en los ácidos húmicos.

5.2.4 Comparación EDAR + H_2O_2 (7) – EDAR + H_2O_2 + AH(8)

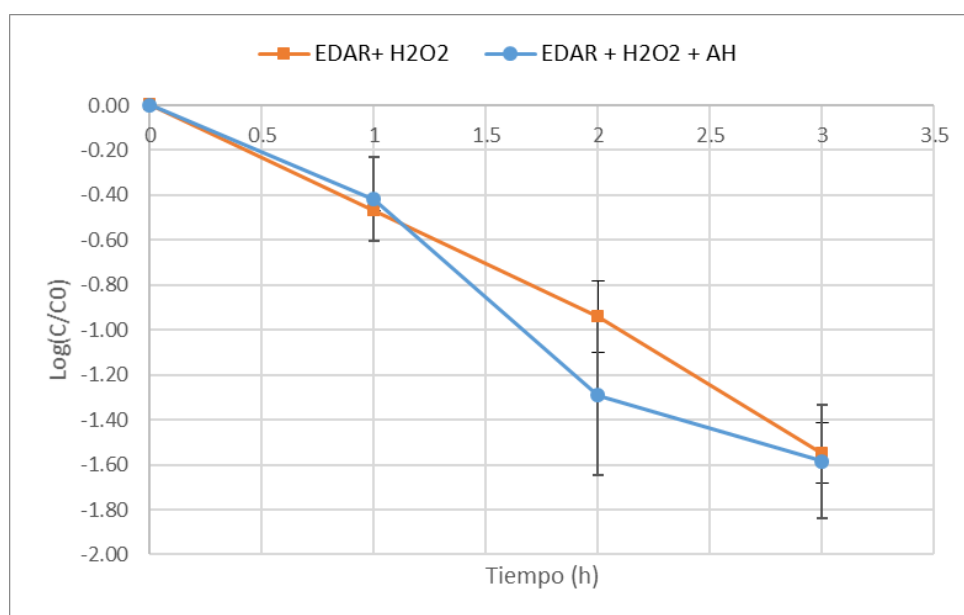


Figura 5.12: Comparación de eliminación de *Clostridium* con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 y con Agua EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH

En la figura 5.12 se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la desinfección del agua de EDAR con H_2O_2 . Se puede observar como el proceso con ácidos húmicos alcanza una mejor eliminación de *Clostridium* que en el proceso sin ácidos húmicos pero ambos resultados son muy similares y prácticamente no hay diferencia.

Como se ha comentado con anterioridad, las condiciones del proceso no parecen favorables como para que se alcance a la fotólisis del peróxido de hidrógeno, así que únicamente actúa la posible radiación que alcance su objetivo de desinfectar y la capacidad oxidante del peróxido de hidrógeno. Por parte de los ácidos húmicos no parecen mostrar mejoría de rendimiento e incluso realizan el efecto de pantalla absorbiendo algunos fotones y dando así lugar a que este sea el experimento con mayor desviación estándar.

5.3 Comparaciones generales

A continuación, se presentan comparaciones de los resultados, donde se puede observar gráficas en las que se representan los resultados según si se ha usado los ácidos húmicos o no en los experimentos:

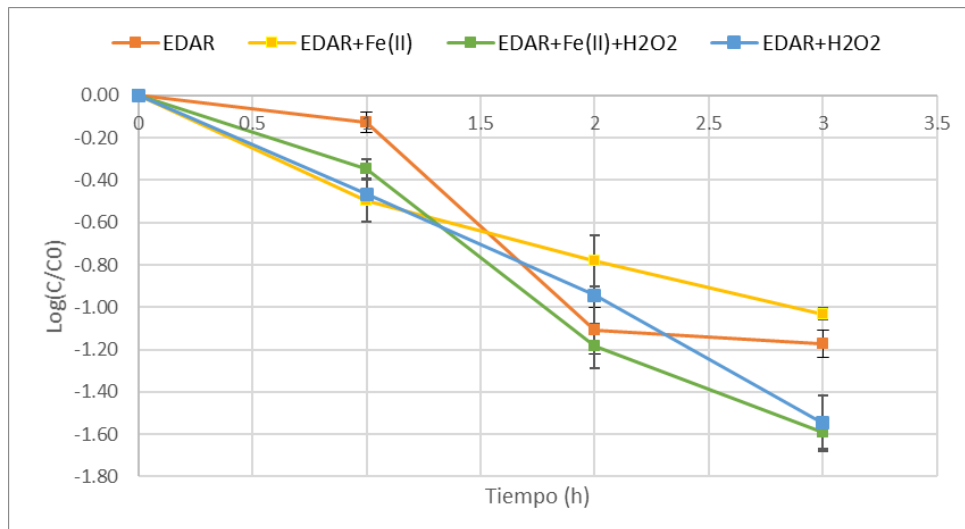


Figura 5.13: Comparación de eliminación de *Clostridium* de experimentos sin Ácidos Húmicos

En esta primera [figura 5.13](#), se puede observar que el mejor rendimiento de eliminación de *Clostridium* lo obtiene el tratamiento realizado con $\text{Fe(II)} + \text{H}_2\text{O}_2$.

Este muy seguido del tratamiento únicamente con H_2O_2 . Por lo que se deduce que la adición del ion de hierro(II) no es suficientemente influyente en el proceso de desinfección como para calificar el proceso con hierro(II) como el mejor método de desinfección ya que la adición de este ion encarecería los costes del tratamiento y se debería tener en cuenta la cantidad del mismo que se añade para cumplir con la normativa de aguas, en este caso, española.

También se puede observar el bajo rendimiento de los procesos con el uso del ion hierro(II) como fotocatalizador a pH tan altos por encima de su umbral, haciendo que prácticamente todo el trabajo realizado de desinfección en esas disoluciones sea realizado por la acción de los fotones o por la otra parte de los fotones más la ayuda del peróxido de hidrógeno.

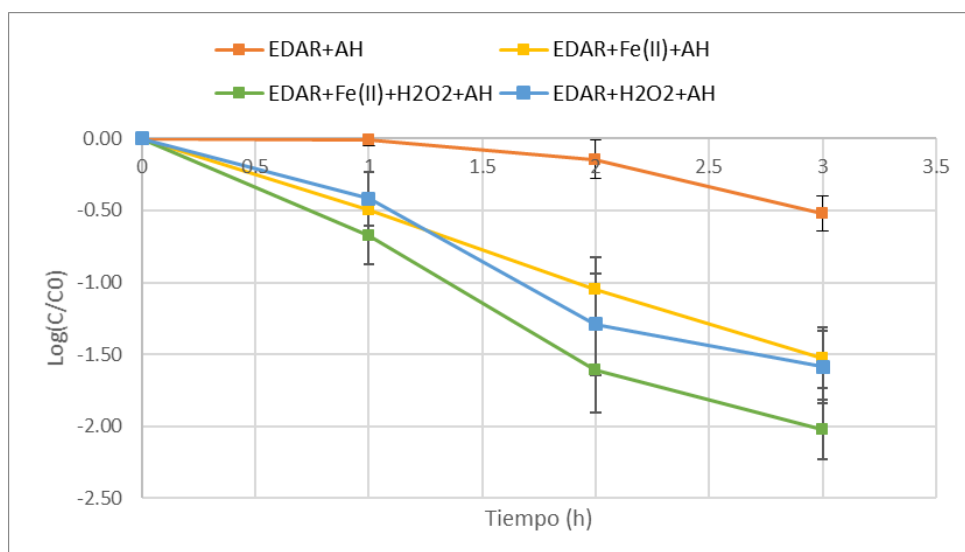


Figura 5.14: Comparación de eliminación de *Clostridium* de experimentos con Ácidos Húmicos

En esta figura 5.14, se observa la comparación de los resultados de los experimentos con la adición de ácidos húmicos. Se puede observar tanto todo lo justificado en las comparaciones anteriores (figura 5.9, figura 5.10, figura 5.11, figura 5.12), como por ejemplo la mejoría de rendimiento en los procesos con el ion hierro(II).

Esto se observaría por ejemplo en la mejora de resultados si comparamos los dos mejores resultados anteriores con estos, donde se puede ver que el proceso con $\text{Fe(II)} + \text{H}_2\text{O}_2$ elimina mucho más *Clostridium*. O también observando el proceso con Fe(II) que ahora es casi tan potente a la hora de desinfección que el proceso con H_2O_2 .

Por parte de rendimientos, el proceso con $\text{Fe(II)} + \text{H}_2\text{O}_2$ es el claro ganador teniendo una diferencia bastante significativa con el resto de procesos.

Por último, se presenta una gráfica de barras donde se presenta el porcentaje de eliminación de *Clostridium* máximo alcanzado en cada experimento:

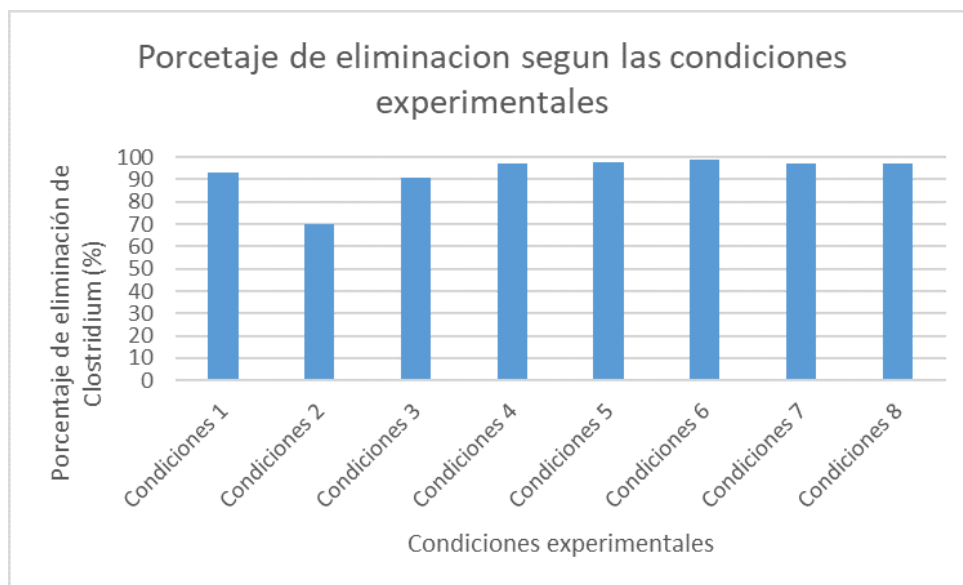


Figura 5.15: Comparación de eliminación de *Clostridium* de experimentos con Ácidos Húmicos

Como se puede observar, las condiciones numero 6 son las que mejor eliminación de *Clostridium* alcanzan, mientras que las que menos son las condiciones 2. Las condiciones restantes presentan un porcentaje de eliminación entre el 90-98 % y las diferencias de los resultados son no muy significativas.

Como conclusión del apartado se llega a que: los ácidos húmicos mejoran el rendimiento de los procesos de desinfección, pero esta mejora no es demasiado significativa y se encuentra dentro del margen de error de los procesos. Pero no se tiene este efecto de mejora en todos los procesos, únicamente, en los procesos con hierro como son las condiciones 4 y 6.

Por otra parte, las adiciones de ácidos húmicos en procesos sin hierro provocan efectos de apantallamiento y absorben luz, con lo que provoca aumento de la desviación estándar e incluso disminuciones del rendimiento del tratamiento terciario.

Como preámbulo del escalado y conclusión de este apartado cabe destacar que observando los resultados se puede no tener ninguna duda en la elección del proceso de SODIS como proceso con mejor rendimiento.

Esto se debe a que, no es necesaria la adición de reactivos y se obtiene un buen resultado, pero este proceso no se considera efectivo debido a que este solo obtiene buen rendimiento en desinfección.

Teniendo en cuenta que pueden quedar trazas de contaminantes conflictivos en el agua a tratar es mucho más seguro trabajar con procesos como foto-Fenton para la eliminación de estas trazas a parte de la desinfección de microorganismos.

6 Escalado

*En este capítulo se describe el método llevado a cabo para escalar los resultados a una planta real donde se llevará a cabo el proceso estudiado para la desinfección de *Clostridium* con mejor rendimiento de desinfección.*

6.1 Planteamiento

El escalado a una planta real de desinfección de *Clostridium* para aguas de riego se basará en los resultados obtenidos en el laboratorio. En primer lugar, se puede obtener entre el 90-99% de eliminación de *Clostridium* según el procedimiento de desinfección utilizado.

Pero, este procedimiento debe durar como mínimo 3h para llegar a esos porcentajes de eliminación. Por tanto, el planteamiento de escalar para trabajar en continuo llevaría a la obtención de tiempos de residencia muy elevados lo que acabaría en un proyecto o muy caro y de muy grandes dimensiones o muy poco eficiente y con muchos fallos.

Por ello, se ha tomado la decisión de trabajar en discontinuo, separando y almacenando durante poco tiempo una porción deliberada del agua a tratar en una EDAR para destinarla al riego. El agua separada no se podrá almacenar durante mucho tiempo debido a la proliferación de los microorganismos presentes en el agua. (Cabrera-Reina et al., 2021)

Tras la captación del agua de la salida del reactor secundario, se trabajará en las 3 horas del día con mayor radiación solar posible para favorecer una mejor desinfección, por lo que se obtendrá un lote de agua desinfectada al día. Las horas de trabajo serán de 12:00 a 15:00.

6.1.1 Reactor

Se plantea un reactor en discontinuo tipo *Raceway*. La decisión ha sido tomada debido a haber encontrado trabajos realizados por la *Solar Energy Research Centre (CIESOL)*, ubicado en la provincia de Almería (España), donde utilizan este tipo de reactores para procesos de desinfección de aguas con métodos como foto-Fenton solar. Este tipo de reactores se suelen emplear en el crecimiento de microalgas, (Narala et al., 2016), pero se presentan varios artículos donde utilizan este reactor para el tratamiento de aguas residuales.

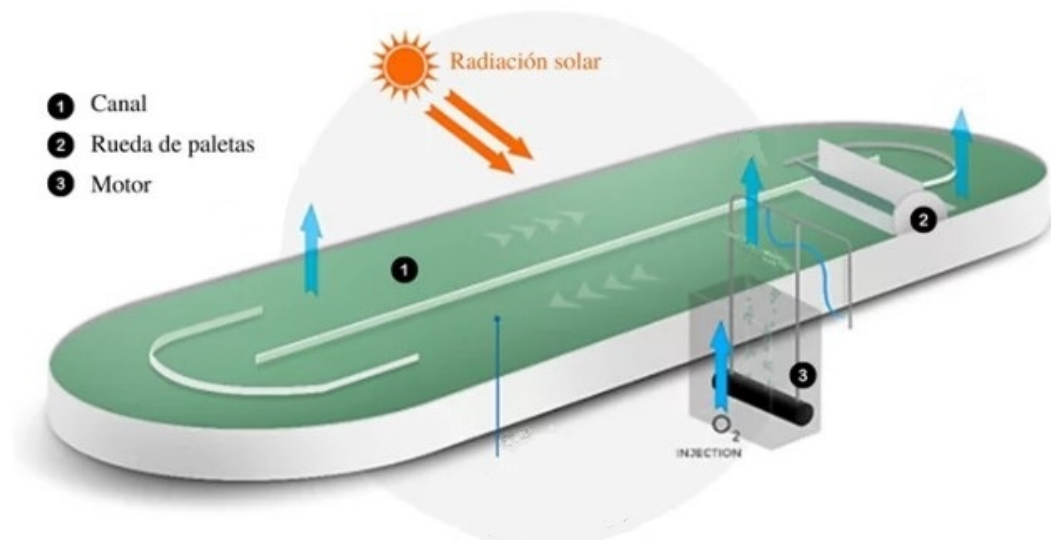


Figura 6.1: Reactor *Raceway* (Sánchez et al., 2022)

Esta metodología de tratamiento ya ha llegado a instalarse en la depuradora de El Bobar siendo la única planta de este estilo en España. En dicha depuradora, se tratan aguas procedentes de alrededor de 230000 personas lo que equivale a $30000 \frac{m^3}{día}$. En esta experiencia se trabaja en discontinuo, por lo que se desvía parte del caudal de salida de la depuradora y se trata en un reactor raceway hasta alcanzar las condiciones que permitan su reuso como agua de riego.

6.1.2 Montaje

EL montaje que se utilizará para el reactor a construir se ha realizado con tal de minimizar los costes al máximo y para ello se muestra una prueba real de la cual se tomaran los datos para probarla.

El montaje realizado por CIESOL, construido con una lona de polietileno de alta densidad provisto por (Geomembrane Alvatech 5002, 1 mm thickness, Sotrafa, Almería, Spain), sujetadas a estacas de 25 cm de alto. Para que el agua se ponga en movimiento y consiga una buena agitación se usa una rueda de paletas con 8 aspas de 1.9 m de ancho x 0.92 m de diámetro. Este sistema está impulsado por un motor eléctrico trifásico de 1 CV (0.75 kW, Cemer Motors, Crespia, Spain) controlado por un variador de frecuencia Delta variador de frecuencia VFD-EL (Delta Electronics, Chachoengsa, Tailandia) que permite controlar y registrar el consumo de energía. (Gualda-Alonso et al., 2022)



Figura 6.2: Montaje del escalado. (a) Bombas de dosificación,(b) Molino de agitación,(c) Balsa reactor *Raceway* (Gualda-Alonso et al., 2022)

6.1.3 Ubicación

Tras la pequeña explicación de la forma de trabajo se presentará que la ubicación planteada para llevar a cabo este proceso. La ubicación influirá por las características y la calidad del sol que alcanzará el proceso.

El proyecto que se está tomando de referencia, como se ha comentado, se encuentra situado en Almería.

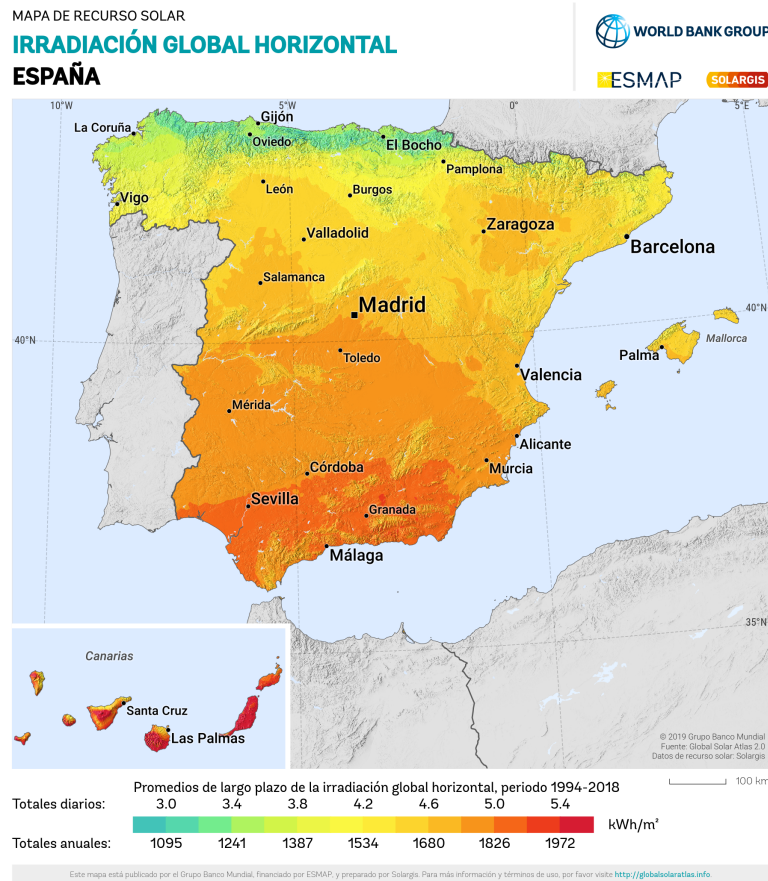


Figura 6.3: Irradiación solar horizontal en España (Solargis, s.f.)

Teniendo en cuenta la latitud del territorio de Almería, la irradiación que se alcanza se encuentra entre los 5 y 5,2 kWh/m^2 . El agua que se ha utilizado en este proyecto proviene de la EDAR de la ciudad de Alcoy, situada en la provincia de Alicante. En esta zona según la figura 6.3 se alcanza entre 4,8 y 5 kWh/m^2 por lo que pese a ser ligeramente menor a la alcanzada en Almería, podría funcionar igualmente. Lo que implica que la localización de este proyecto se encontrara en la ciudad de Alcoy.

6.2 Cálculos realizados

6.2.1 Tamaño de la planta

Para el estudio realizado en El Bobar se emplea una superficie de $100m^2$. En este reactor se ha optimizado la relación entre la longitud de la balsa y la anchura de canal ($\frac{L}{W}$). Esta relación es muy importante porque que sea superior a 10 minimiza el efecto de zonas muertas, pero cuanto más alto sea este valor mayor será el tiempo necesario para el mezclado llegando a ser superior a la hora. Por lo tanto se llega a la conclusión de que este ratio es óptimo a 12.5, lo que implica una balsa de 25 m de largo y una anchura de canal de 2 m. (Gualda-Alonso et al., 2022)

Para este escalado se emplearán las mismas medidas debido a que los procesos que se emplearan son muy similares a los que se han empleado de manera real en CIESOL.

$$25m \cdot (2m \cdot 2m) = 100m^2 \quad (6.1)$$

6.2.2 Profundidad del reactor

Para la determinación de la profundidad de la balsa se tiene en cuenta los experimentos llevados a cabo en el laboratorio. Para ello se requiere de la medición de la irradiancia del simulador usado, la cual es $32W/m^2$. Teniendo en cuenta que se desea alcanzar la misma cantidad de absorción de energía que en el laboratorio, se plantean los siguientes cálculos:

$$E = I \cdot \frac{t * A}{V} \quad (6.2)$$

Donde:

E= Energía absorbida por el sistema (J/L)

I= Irradiancia por m^2 en este caso solar (W/m^2)

t= tiempo de exposición a la luz (s)

A= Área de exposición (m^2)

V= Volumen irradiado L

$$E = 32W/m^2 \cdot \frac{10800s \cdot 0,314m^2}{0,1L} = 1085,2kJ/L \quad (6.3)$$

En la ecuación anterior se presenta la energía absorbida por litro de agua por el sistema planteado en el laboratorio, lo que aporta el valor de $1085,2kJ/L$. Igualando las condiciones del laboratorio al sistema escalado, se requiere que este valor sea similar teniendo condiciones solares reales para así averiguar el valor de profundidad óptimo que debería tener el sistema. Para los cálculos del sistema real se toma como irradiancia $30W/m^2$, lo cual es una referencia de días soleados en primavera. Eso hace que en verano se registre más irradiancia (hasta $42-44 W/m^2$) y en invierno menos ($14-16 W/m^2$)

La siguiente ecuación presenta la absorción de energía por litro de agua en el sistema con 10 cm de profundidad:

$$30W/m^2 \cdot \frac{10800s \cdot 100m^2}{10000L} = 3240J/L \quad (6.4)$$

Se realiza la ecuación igualando las dos anteriores y haciendo que la incógnita sea la profundidad:

$$30W/m^2 \cdot \frac{10800s \cdot 100m^2}{25m \cdot 4m \cdot X} = 1085184J/L \quad (6.5)$$

$$X = 1cm \quad (6.6)$$

Con este cálculo se demuestra que pese a que se alcance el valor de absorción de energía en el sistema la cantidad de agua a tratar sería mucho más baja.

No obstante, igualar la radiación absorbida por unidad de volumen solamente tiene sentido si todos los fotones son absorbidos por el sistema. En nuestro caso, por experiencias previas y por comparación con otros sistemas publicados (Vallés et al., 2023), sabemos que ha habido un exceso de radiación que no ha sido absorbida por lo que emplearemos las alturas de líquido calculadas en el trabajo del CIESOL ya que nuestro sistema es muy similar.

Este exceso de radiación empleada se debe al pequeño volumen que hemos empleado en cada proceso. Se eligieron 100mL ya que es el volumen que se ha de filtrar para la determinación del microorganismo

6.2.3 Capacidad máxima de la planta

Como se ha comentado en el apartado anterior, la superficie que ocupa el reactor es de $100m^2$ y teniendo en cuenta que las estacas que forman la balsa son de 25 cm se pondrán como máximo 20 cm de profundidad en el reactor para evitar posibles reboses debido a la agitación. Con lo cual, la capacidad máxima de agua a tratar de la planta será de $20m^3$.

$$100m^2 \cdot 0,2m = 20m^3 \quad (6.7)$$

Esta profundidad determinará el agua total que se obtendrá tras cada periodo de trabajo de la planta y a su vez este vendrá determinado por la calidad del sol que se presente en cada día medido por el radiómetro disponible, siendo los días nublados los días que se establezca una menor profundidad para favorecer la que los fotones alcancen toda la disolución de forma correcta y viceversa.

6.3 Diseño de la planta

Se estima que la EDAR de Alcoy produce diariamente alrededor de $7000m^3/dia$. El proceso desviará alrededor del 0.1 % del agua que trata la EDAR de Alcoy (alrededor de 20000 L) para la desinfección de microorganismos mediante la planta descrita para su distribución al riego.

A continuación, se presenta el diseño completo del proceso de desinfección propuesto por CIESOL en la [figura 6.4](#):

Esta planta funciona de forma parecida al objetivo al que se quiere llegar, pero debido a, que el reactor tiene un gradiente de pH para la eliminación de contaminantes como el carbonato y para el funcionamiento óptimo del foto-Fenton, se dispone de un sistema de

bombas complejo que funcionan para la realización de ese gradiente de pH según la zona del reactor donde se encuentre como se ve en la [figura 6.5](#).

Al final del proceso también se puede encontrar un filtro de cal para la eliminación de precipitados y iones presentes en el agua.



Figura 6.4: Diseño completo para la planta de desinfección. (a) Bombas de dosificación, (b) Molino de agitación, (c) Balsa reactor *Raceway*, (d) tanque de acondicionamiento, (e) filtro de carbonato de calcio, (f) tanque de almacenamiento (Gualda-Alonso et al., 2022)

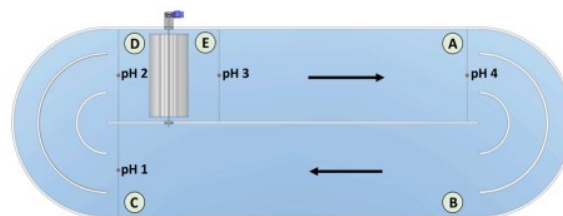


Figura 6.5: Gradiente de pH en el proyecto de CIESOL (Gualda-Alonso et al., 2022)

Seguidamente, se presenta la planta propuesta a partir de la anterior, con variaciones debido al abaratamiento de costes y el uso in situ de los ácidos húmicos, que se usan junto al foto-Fenton para evitar la complejidad del gradiente de pH mencionado anteriormente.

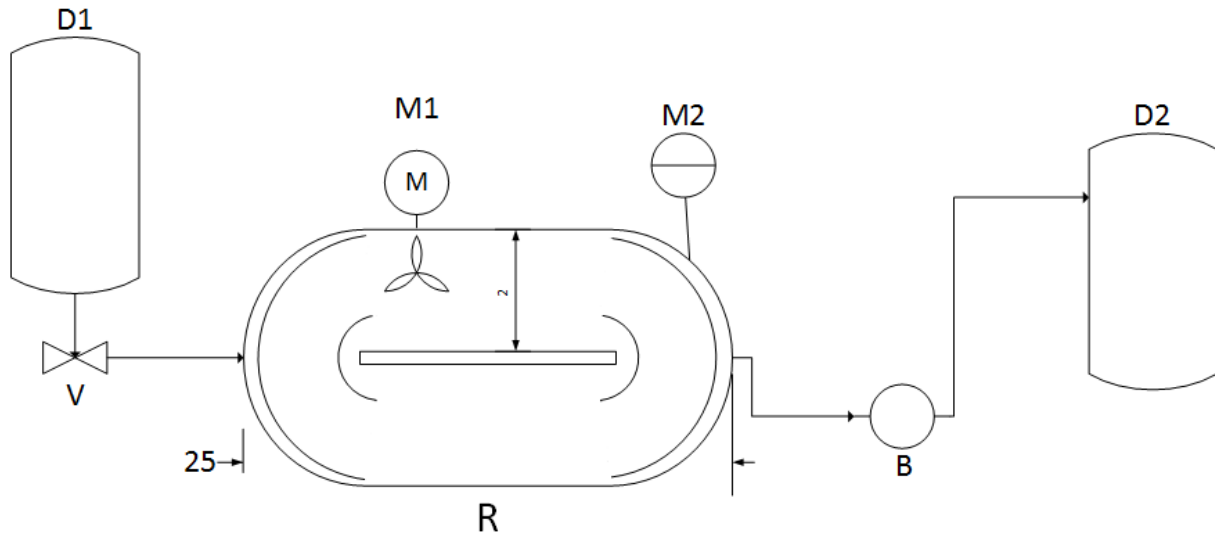


Figura 6.6: Diagrama de flujo del proceso de desinfección

El la [figura 6.6](#) mostrada se observa el diseño del diagrama de flujo completo propuesto, donde:

- R = Reactor Raceway
- M1 = Motor
- M2 = Radiómetro
- D1 = Depósito de captación
- V = Válvula
- B = Bomba
- D2 = Depósito de almacenaje

El funcionamiento completo del tratamiento terciario consiste en:

La captación del agua ocurre a la salida del tratamiento secundario de la EDAR. Antes de que ocurra el proceso se debe almacenar el agua a tratar hasta la hora óptima de trabajo comentada en [sección 6.1](#).

Seguidamente se debe cargar el reactor Raceway, explicado en la [subsección 6.1.2](#), con el agua captada. Según la irradiancia medida por el radiómetro se deberá llenar hasta la profundidad óptima calculada y así calcular el volumen del lote a tratar, para añadir los reactivos a las concentraciones especificadas en el proceso de laboratorio.

Tras la desinfección de 3 horas, esta agua tratada pasará directamente a un depósito donde los posibles sedimentos se quedarán al fondo y tras varios días se vaciará el tanque para la distribución del agua para el riego.

7 Estudio económico

En este capítulo se obtiene el presupuesto de inversión y explotación del proyecto y su la viabilidad económica con los resultados del [Capítulo 6](#) de dos de los procesos empleados para comparar su rentabilidad.

Es posible estimar aproximadamente el costo después de que se haya completado el dimensionamiento. Por año de obra, se supondrá tratar un volumen determinado de aguas residuales en este caso. Para ello se tendrán en cuenta todos los componentes, reactivos y personal necesarios para su correcto funcionamiento en marcha.

7.1 Presupuesto de inversión

El presupuesto de inversión consiste en la suma de dinero necesario para poder iniciar las operaciones pertinentes deseadas, es este caso, el uso de un reactor discontinuo tipo *Raceway* para la eliminación de *Clostridium* de aguas residuales de una EDAR para el riego. Esto abarcará todos los bienes y su coste que sean aportados con anterioridad a la puesta en marcha del proceso en el mercado actual.

En consecuencia, se debe mencionar que como se ha hablado anteriormente, el diseño para el escalado industrial ha sido basado en los estudios realizados en El Bobar (Almería) y en los artículos publicados por ellos mismos sobre estos estudios. El montaje del reactor ha sido explicado en [subsección 6.1.2](#), este montaje según los resultados obtenidos por los estudios de El Bobar determina que cuesta 10€ por metro cuadrado de superficie del reactor. Este precio incluye el montaje de las estacas con la lona de polietileno de alta densidad junto con las paredes y el montaje de la rueda con las paletas. La superficie total del reactor desado es de $100m^2$, por tanto:

$$10 \frac{\text{€}}{m^2} \cdot 100m^2 = 1000\text{€} \quad (7.1)$$

Seguidamente, se buscan dos depósitos con tapón de PVC de $60m^3$, para que se puedan almacenar 3 lotes a capacidad máxima, ya que $20m^3$ será la capacidad máxima a producir por lote en la planta. Estos dos depósitos serán el depósito de captación donde se almacenará el agua antes del proceso y tras el preces pasará al depósito de almacenamiento

hasta su distribución, provistos por: (Edagua). Este último tendrá la parte baja en forma cónica para la sedimentación de los precipitados formados.

A continuación, se buscará presupuesto para el motor de potencia 2.2kW, provisto por: (Vevor), el cual accionara la rueda con aspas que realizan la agitación dentro del proceso, un radiómetro que medirá la erradica de cada día para determinar la profundidad que debería tener la balsa y una bomba con 2C.V para la carga y descarga del sistema.

Por último, se busca el precio de los filtros de cal industriales.

Concepto	Precio(€)
Reactor	1000
Depósito de captación	3170,00
Depósito de amacenaje	3170,00
Radiómetro	2650
Motor	125.99
Bomba	219.87
Inversión inicial	103335.86

Tabla 7.1: Equipo necesario para el montaje de la planta junto a su precio

Para conocer el gasto de inversión de la planta se necesita conocer el tiempo de vida útil de esta. Se supone un funcionamiento óptimo durante 10 años, por tanto, los gastos de inversión serían:

$$GI = \frac{I}{U} \quad (7.2)$$

Donde:

GI =Gastos de inversión (€)/año

I= inversión inicial (€)

U=Vida útil de la planta (años)

De modo que, la inversión inicial realizada, la cual es 103335.86 €, da pie a que junto con el tiempo de vida útil de la planta se obtenga el gasto de inversión: 1033.59 €/año

7.2 Presupuesto de explotación

Los gastos de explotación hacen referencia a la estimación del coste de mantener el proceso en completo funcionamiento. En este caso se presentan valores aproximados, ya que dichos costes solo se sabrán con exactitud cuando el sistema entre en funcionamiento.

7.2.1 Costes fijos

Seguidamente, se muestran los costes fijos, los cuales consisten en aquellos independientes de la producción, permaneciendo como constantes a lo largo de un gran periodo de tiempo y abonados periódicamente.

Coste de personal

A continuación, se presentarán los costes pertinentes al personal encargado del manejo del sistema de desinfección tratado en el trabajo. Como gastos solo se incluirán las horas que este operario dedique únicamente a la manipulación de la planta, por tanto, las horas fuera de esta zona de trabajo no serán contabilizadas como gasto personal de este trabajo.

La tarea realizada por dicho operario constará de, la carga y descarga de los depósitos tanto fuera como dentro del reactor para su desinfección. También se le atribuye la responsabilidad del cálculo de profundidad necesaria según el sol disponible en cada día medido por el radiómetro y el cálculo de volumen de agua tratado en cada lote, para posteriormente inocular al sistema los reactivos, en sus concentraciones pertinentes.

Teniendo en cuenta el trabajo a realizar, será necesaria la presencia de un técnico de laboratorio durante alrededor de una hora como máximo, para la descarga del depósito de captación, cálculo del volumen necesario, y preparación de los reactivos a utilizar se estiman como máximo unos 30min. Tras la desinfección se descargará el reactor para pasarlo al tanque de acondicionamiento y hacerlo pasar por el filtro de carbonato de calcio hasta el tanque de almacenaje se estima que se tardará otros 30min.

A continuación, siguiendo el Boletín Oficial del Estado (BOE) publicado el 23 de enero de 2020 por el ministerio de trabajo y economía social, número 20, sección III, página 6885, se puede encontrar los salarios establecidos. (“Ministerio de Trabajo y Economía Social, Boletín Oficial del Estado”, 2020). En el caso de un técnico de laboratorio, su salario base indicado son 16439.88 € anuales, trabajando 8 horas diarias. Este es el valor bruto del salario del trabajador, sin embargo, la empresa debe hacerse cargo del coste de la seguridad social del trabajador.

En este caso la empresa debe hacer cuatro pagos adicionales al salario base, estos son:

- Contingencias comunes: 23.6 % del salario base
- Tipo general de desempleo para contrato indefinido: 5.5 % del salario base
- Fondo de garantía salarial(FOGASA): 0.2 % del salario base
- Para formación profesional: 0.7 % del salario base

Por último, se establece el coste que representa este trabajador teniendo en cuenta todo lo mencionado.

Concepto	C personal 8h/día (€/año)	C personal 1h/día (€/año)
Salario base	16439.88	2054.99
Contingencias comunes	3879.81	484.98
Tipo general de desempleo	904.19	113.02
FOGASA	32.88	4.11
Formación profesional	115.08	14.38
Total	21371.844	2671.4805

Tabla 7.2: Coste de personal

Finalmente, se obtiene el valor de coste de personal de 2671.48 € anuales respectivos al trabajo humano a realizar en la planta de desinfección.

Coste de amortización

En la economía actual, la amortización es conocida como la pérdida de valor de un bien tras su uso, uso en el que está siendo útil. En este caso, estamos hablando del agua tratada anualmente. Por tanto:

$$CA = \frac{GI}{V(\text{anual})} \quad (7.3)$$

Donde:

CA= Coste de amortización (€/m³)

GI= Gastos de inversión (€/año)

V(anual)= Volumen de agua tratada (m³/año)

Dentro de esta ecuación, no se conoce el valor del volumen anual tratado de agua. Como bien se ha dicho, este proceso trabaja en discontinuo tratando un porcentaje del agua de salida del reactor secundario para la eliminación de microorganismos y posteriormente darle uso en el riego de campos.

Teniendo en cuenta el calendario laboral de la provincia de Alicante se observa que la cantidad de días laborales hábiles al año es de 248 teniendo en cuenta los festivos locales de cada población (Conseller de Economía Sostenible, 2022). Teniendo en cuenta que se tratan entre 10 y 20 m³ al día aproximando se queda en una media de 15 m³ diarios y 3720 m³ anuales.

De este modo, se aplica la formula mencionada y se obtienen unos gastos de amortización de 0.28 (€/m³).

Coste de mantenimiento

Los gastos de mantenimiento (M) hacen referencia a los gastos realizados por la empresa debido a los servicios externos e internos, que son necesarios para el correcto funcionamiento de las instalaciones, así como su alargamiento de tiempo de vida útil para llevar a cabo la actividad.

En este apartado no se tienen en cuenta los fallos o daños que pueden encontrarse por defecto de fábrica.

Dichos gastos corresponden aproximadamente a un 2% de los gastos de amortización, por lo tanto, sabiendo que los gastos de amortización son de 0.28 (€/m³), los gastos de mantenimiento son de 0.0055 (€/m³), o lo que es lo mismo, 20.46 €/año.

7.2.2 Costes variables

Los costes variables son conocidos como los costes que varían de manera proporcional a la cantidad de agua residual tratada. Estos aumentan de manera directa con el aumento de volumen de agua a tratada

Costes energéticos

Por parte de los costes energéticos, hacen referencia al coste de energía usada por todos los componente del sistema para poder llevar a cabo el tratamiento.

Cuantificar estos gastos debe empezar por conocer la potencia total de la planta, el coste de esa potencia, el tiempo de uso por día de cada elemento, los días anuales de trabajo y el volumen tratado en ese tiempo. Con estos valores se completa el cálculo de los gastos energéticos (E):

$$E = \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_d}{V} \quad (7.4)$$

Donde:

E = gasto energético (€/m³)

C_w = coste de la potencia (€/kW · h)

W = Potencia de la planta (kW)

D = días trabajados al año (días/año)

t_d = tiempo diario que funciona la planta (h/día)

La obtención del coste de la potencia se ha obtenido por la que la Empresa Nacional de Electricidad Sociedad Anónima (ENDESA) distribuye la luz. Este precio se ha tomado

en 2023 y se trata de una media de las subidas y bajadas que se observan con respecto a la hora del día, este precio es $0,1360\text{€}/kW \cdot h$.

La potencia de la planta se constituye de la potencia requerida por el motor de agitación y la bomba, dichas potencias son conocidas y son $2,2kW$ y $2CV$ respectivamente. Haciendo la conversión de CV a kW se obtienen $1,49kW$ por parte de la bomba.

Por parte del cálculo del tiempo diario de trabajo, el motor de agitación trabajará al día las 3 horas de tratamiento, mientras que la bomba únicamente trabajará en los momentos de carga y descarga los depósitos. Este tiempo se puede calcular, en las especificaciones de la bomba se especifica que presenta mucha variedad de caudales, en este cálculo se tomará el más rápido para minimizar el tiempo de trabajo, que es $30000L/h$ pero se aplicara el volumen máximo de la planta, que son $20m^3$. El tiempo de carga y descarga de este proceso es de 40 min.

Finalmente, como se ha comentado anteriormente la planta estará en activo durante 248 días al año y trata $3720m^3$ al año.

De modo que se obtiene:

$$E_b = \frac{0,1360 \cdot 1,49 \cdot 248 \cdot 1,33}{3720} = 0,018(\text{€}/m^3) \quad (7.5)$$

$$E_m = \frac{0,1360 \cdot 2,2 \cdot 248 \cdot 3}{3720} = 0,061(\text{€}/m^3) \quad (7.6)$$

$$E = E_b + E_m = 0,079(\text{€}/m^3) \quad (7.7)$$

De este modo se obtiene que el valor del coste energético es: $0,079(\text{€}/m^3)$, o lo que es lo mismo, $293.88 \text{€}/\text{año}$.

Costes de reactivos

El apartado siguiente es de gran importancia, en este se abarcan los costes generados por los productos químicos (R) que se utilizan durante el proceso de desinfección planteado. Para ello se debe tener en cuenta el volumen que se trata dentro de la planta anualmente, dato conocido y usado varias veces hasta ahora: $3720m^3$. Teniendo en cuenta que se realiza un lote por día de trabajo, se realizarán 248 lotes en todo el año, o lo que es lo mismo, son 248 veces que deberán inocularse los reactivos en el sistema.

Por tanto, se debe conocer cuanta cantidad de cada reactivo será necesario en cada proceso para multiplicarlo por los días de trabajo.

Los reactivos a utilizar en el sistema de desinfección serán los utilizados en la combinación número 6, la cual contiene Fe(II), H_2O_2 y ácidos húmicos. Como se ha comentado en [subsección 3.3.1](#), las concentraciones utilizadas a escala de laboratorio han sido:

$$[H_2O_2] = 50 \mu L/100 \text{ ml}$$

$$[Fe(II)] = 5 \text{ mg/L}$$

$$[AH] = 10 \text{ mg/L}$$

Por lo que, para el tratamiento de $3720m^3$, se requerirán: 372 L de H_2O_2 , 18600 g de $FeSO_4$ y 37200 g de ácidos húmicos. Estos valores representan las cantidades de reactivos gastados en un año. Su coste es muy diferente debido a que no se venden estas cantidades de forma comercial, por tanto, se realiza la siguiente tabla:

Reactivo	C. por venta	Precio (€/ud)	C. 1 m^3	Precio (€/m ³)
Peróxido de hidrógeno	25 L	57.82	0.1 L	0.23
Sulfato de hierro	1 kg	9.56	5 g	0.05
Ácidos húmicos	100 g	71.5	10 g	7.15

Tabla 7.3: Precios y cantidades de reactivos por m³ de agua

En la [tabla 7.3](#) se pueden observar los precios y cantidades de los reactivos usados en escala de laboratorio necesarios para el proceso y las cantidades necesarias para el tratamiento de $1m^3$ de agua. Con lo que se obtiene que el coste de los productos químicos es de 7.43 (€/m³, o lo que es lo mismo, 27639.6 €/año.

Costes de explotación totales

Para finalizar se obtienen los costes de operación totales, sumando los apartados de: costes de personal (P), coste de mantenimiento (M), costes energéticos (E) y costes de reactivos (R), los cuales han sido definidos en sus respectivos apartados:

$$CEx = P + M + E + R \quad (7.8)$$

- P = 2671.48 €/año
- M = 20.46 €/año
- E = 293.88 €/año
- R = 27639.6 €/año

Con estos valores se obtiene un coste de explotación anual de: 30625.42 €/año.

7.3 Costes totales

Una vez obtenidos los valores de los costes de inversión, 1033.59 €/año y explotación, 30625.42 €/año se puede determinar los costes totales anuales de la planta: 31659.01 €/año.

También se puede determinar el coste que lleva la desinfección de $1m^3$ de agua residual: 8.51 €/m³.

Como se puede observar este precio es muy elevado para tratarse de un tratamiento terciario, esto se debe a que el 96 % de los costes de reactivos, que es el coste mas elevado, son dados por los ácidos húmicos utilizados.

7.4 Propuesta alternativa sin ácidos húmicos

Teniendo en cuenta el precio por $1 m^3$ tratado de agua obtenido en la [sección 7.3](#) y que los resultados entre las combinaciones 5 presenta una eliminación de *Clostridium* alrededor de un 2 % menor a la combinación 6, lo cual no se considera una mejora significativa, se propone presentar el coste del proceso sin la adición de los ácidos húmicos.

En este caso los costes de inversión serian los mismos al caso anterior: 1033.59 €/año. Por parte de los costes de explotación obtendríamos que, los costes fijos se mantendrían como los del caso anterior por igual:

- P = 2671.48 €/año
- M = 20.46 €/año

Por parte de los costes variables, únicamente se mantendría igual al caso anterior el valor del coste energético, siendo este: E = 293.88 €/año.

Por último, los costes de los reactivos serán mucho menores al anterior debido a que el mayor coste que eran los ácidos húmicos no se incluyen:

Reactivo	C. por venta	Precio (€/ud)	C. 1 m ³	Precio (€/m ³)
Peróxido de hidrógeno	25 L	57.82	0.1 L	0.23
Sulfato de hierro	1 kg	9.56	5 g	0.05

Tabla 7.4: Precios y cantidades de reactivos por m³ de agua del presupuesto 2

Siendo los costes por reactivos: R = 1041.6 €/año. Por tanto, el valor obtenido por costes de explotación: 4027.42 €/año.

Finalmente se obtienen los costes totales realizando la suma de los costes de inversión y los de explotación. Se obtiene un valor de: 5061.01 €/año.

Como se puede observar, este valor es mucho mas bajo, en concreto un 84% en comparación con el caso anterior, y con el cual se obtiene un coste m^3 de: 1.36 €/m³.

Este coste es mas de 6 veces menor al coste que se presenta en el proceso con ácidos húmicos, con prácticamente el mismo porcentaje de eliminación experimentalmente, por lo que se considera que este proceso sin ácidos húmicos es mas rentable.

8 Conclusiones

En este proyecto final de grado se han utilizado tratamientos fotoquímicos solares para abordar el tema de la desinfección de *Clostridium* en aguas residuales de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), tanto en presencia como en ausencia de ácidos húmicos. Los factores primarios y las soluciones a este problema han sido examinados a lo largo de la investigación.

En primer lugar, se ha realizado un análisis exhaustivo de la literatura existente sobre tratamientos solares fotoquímicos y desinfección de aguas residuales, así como el papel de los ácidos húmicos en este proceso. Esto ha permitido contextualizar el trabajo y comprender el estado del conocimiento del campo en la actualidad.

En consecuencia, se han establecido los objetivos de investigación necesarios para abordar la desinfección de *Clostridium* en aguas residuales de EDAR mediante tratamientos solares fotoquímicos, con y sin Ácidos Húmicos. Esto se ha logrado mediante el uso de una variedad de métodos y técnicas, tales como todas las combinaciones tratadas y explicadas tanto en la [sección 3.3](#) como en el [Capítulo 5](#), que han proporcionado la información necesaria para analizar y evaluar los aspectos pertinentes del tema.

Los resultados muestran que:

- Se ha establecido que los tratamientos fotoquímicos solares, con y sin ácidos húmicos, son capaces de erradicar *Clostridium* de las aguas residuales de las EDAR, pero los más eficientes son la combinación EDAR + Fe(II) + H_2O_2 (5) y EDAR + Fe(II) + H_2O_2 + AH (6).
- Se ha observado que la presencia de ácidos húmicos puede potenciar la eficacia de los tratamientos solares fotoquímicos complejando al hierro y potenciando la erradicación de microorganismos patógenos.
- A su vez, se ha comprobado también, que los ácidos húmicos realizan efectos de apantallamiento lo que hace que los fotones no lleguen de forma correcta a toda la disolución, entorpeciendo así el proceso de desinfección.

- Los ácidos húmicos utilizados pertenecientes a la marca utilizada mostrado en [figura 3.1](#), son moléculas mucho menos complejas de a los ácidos húmicos estudiados en otras referencias y mostrados en [subsección 1.5.5](#), lo que forma complejos menos activos y da lugar a que su rendimiento no mejore lo suficiente al pH al que se trabaja en este trabajo.
- El precio de los ácidos húmicos comerciales utilizados previene de su uso a gran escala ya que hace el proceso inviable económicamente debido a su alto precio.

Es crucial tener en cuenta que, a pesar de los hallazgos alentadores, también se han observado algunas limitaciones en la investigación, como la variabilidad de la radiación solar o la necesidad de una investigación más amplia o la incertidumbre y poca información sobre los ácidos húmicos en este ámbito. Estas limitaciones resaltan áreas para el desarrollo y presentan oportunidades para estudios adicionales.

En conclusión, al abordar el tema específico de la presencia de *Clostridium* en una EDAR mediante tratamientos solares fotoquímicos, teniendo en cuenta la presencia o ausencia de Ácidos Húmicos, este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto una aportación al campo de la desinfección de aguas residuales. Los resultados obtenidos muestran que los tratamientos fotoquímicos solares son efectivos y que los ácidos húmicos pueden mejorar su rendimiento aunque depende de los ácidos húmicos utilizados.

Durante el desarrollo de este trabajo se han adquirido conocimientos y habilidades fundamentales en el uso de tratamientos fotoquímicos solares y desinfección de aguas residuales. El desarrollo personal y profesional del autor se ha visto beneficiado con este TFG, que ha supuesto una experiencia gratificante que le ha permitido poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos durante su formación académica.

Bibliografía

- Armijos Guamán, J. L., & Coronel Carrión, T. N. (2022). *Diseño e implementación de reactor de flujo continuo con diodos emisores de luz ultravioleta para desinfección de agua de consumo humano* (B.S. thesis). (Vid. págs. 14, 15).
- Bintsis, T. (2017). Logarithmic Scale for Microbial Inactivation. *Journal of Food Protection*, 80(10), 1672-1682. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-126> (vid. pág. 43)
- Buxton, G. V., Greenstock, C. L., Helman, W. P., & Ross, A. B. (1988). Disinfection of water containing viruses using photo-Fenton-like reaction. *Water Research* (vid. pág. 7).
- Cabrera-Reina, A., Miralles-Cuevas, S., Pérez, J. S., & Salazar, R. (2021). Application of solar photo-Fenton in raceway pond reactors: A review. *Science of The Total Environment*, 800, 149653 (vid. pág. 58).
- Conseller de Economía Sostenible, C. y. T., Sectores Productivos. (2022). RESOLUCIÓN de 14 de diciembre de 2022, del conseller de Economía Sostenible, Sectores Productivos, Comercio y Trabajo, por la que se aprueba el calendario de fiestas locales, retribuidas y no recuperables, en el ámbito de la Comunitat Valenciana para el año 2023. [2022/11962] [Boletín Oficial del Estado, núm. [número], [fecha de publicación]]. (Vid. pág. 69).
- Durán-Álvarez, J. C., Avella, E., & Zanella, R. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 8(14), 17-39 (vid. pág. 14).
- Fijalkowski, K., Kacprzak, M., & Rorat, A. (2014). Occurrence changes of *Escherichia coli* (including O157: H7 serotype) in wastewater and sewage sludge by quantitation method of (EMA) real time—PCR. *Desalination and Water Treatment*, 52(19-21), 3965-3972 (vid. pág. 7).

- García, A. B., Rodríguez, C. A., & Martínez, E. F. (2019). Efficiency of ultraviolet disinfection of treated wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(5), 712-720. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.649132> (vid. pág. 12)
- Gray, N. F. (2004). *Biology of wastewater treatment* (Vol. 4). World Scientific. (Vid. págs. 9, 10).
- Gualda-Alonso, E., Soriano-Molina, P., López, J. C., Sánchez, J. G., Plaza-Bolaños, P., Agüera, A., & Pérez, J. S. (2022). Large-scale raceway pond reactor for CEC removal from municipal WWTP effluents by solar photo-Fenton. *Applied Catalysis B: Environmental*, 319, 121908 (vid. págs. 59-61, 64).
- Johnson, D. L., Smith, K. L., & Brown, M. W. (2020). Evaluation of chlorination and ozonation as disinfection techniques for wastewater. *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8902-8910. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01758> (vid. pág. 9)
- Kirchhoff, L., Odermatt, R. P., Holm, R. H., Huelsen, T., & Meile, R. (2013). Solar water disinfection (SODIS) efficacy monitoring by low-cost lux and turbidity measurements. *Water Research*, 47(13), 4411-4420 (vid. pág. 11).
- Martin, M. (2011). *Caracterización y fotoquímica de sustancias húmicas de diferentes orígenes* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de La Plata. (Vid. pág. 19).
- McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H.-J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernandez-Ibañez, P. (2012). Solar Water Disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, 235, 29-46 (vid. pág. 10).
- Metcalf, L. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Metcalf & Eddy Inc. *McGraw-Hill Inc., New York. Mohammed, AN and ElBably, MA (2016). Technologies of domestic wastewater treatment and reuse: options of application in developing countries. JSM Environ Sci Ecol*, 4(3), 1033 (vid. pág. 3).
- Ministerio de Trabajo y Economía Social, Boletín Oficial del Estado [Núm. 20 Sec. III. Pág 6885]. (2020). (Vid. pág. 68).
- Narala, R. R., Garg, S., Sharma, K. K., Thomas-Hall, S. R., Deme, M., Li, Y., & Schenk, P. M. (2016). Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. *Frontiers in Energy Research*, 4, 29 (vid. pág. 58).
- Organization, W. H. (2006a). *Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water*. World Health Organization. (Vid. pág. 19).
- Organization, W. H. (2006b). *WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater* (Vol. 1). (Vid. págs. 1, 2, 6).

- Parliament, E., & of the European Union, C. (2020). REGULATION (EU), 2020/741 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>. (Vid. pág. 20)
- Rice, E. W., Bridgewater, L., Association, A. P. H., et al. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 10). American public health association Washington, DC. (Vid. pág. 5).
- Rice, O. T., Minister, H., & Astuti, S. Y. (2012). Water scarcity: A global issue. *Aquatic Procedia*, 4, 7-13 (vid. págs. 1, 20).
- Sánchez, Á. H., Sánchez, J. L. G., Úbeda, J. C. M., & Torrico, A. B. (2022). Control robusto del pH en un fotobiorreactor raceway. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 19(3), 274-283 (vid. pág. 59).
- Smith, J. A., Johnson, B. R., & Davis, C. D. (2018). Evaluation of disinfection methods for wastewater reuse. *Water Research*, 42(8), 2157-2166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.029> (vid. pág. 10)
- Solargis, E. (s.f.). Global Solar Atlas. (Vid. pág. 61).
- Suárez, J. S. (2018). *Capacidad coordinante del hierro (III) con ácidos tetrametilcarboxílicos derivados de orto-fenilendiaminas* (Tesis doctoral). Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain). (Vid. pág. 18).
- Tobón, S. R., Cadavid, R. M. A., & Builes, L. A. G. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236-247 (vid. pág. 8).
- Vallés, I., Sciscenko, I., Mora, M., Micó, P., Amat, A. M., Santos-Juanes, L., Moreno-Andrés, J., & Arques, A. (2023). On the relevant role of iron complexation for the performance of photo-Fenton process at mild pH: Role of ring substitution in phenolic ligand and interaction with halides. *Applied Catalysis B: Environmental*, 331, 122708. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092633732300351X> (vid. pág. 63)
- Zepp, R. G., Erickson, D. J., Paul, N. D., & Sulzberger, B. (2002). The role of solar UV radiation in aquatic ecosystems: mechanisms, effects, and interactions with climate change. *Photochemistry and photobiology*, 6(4), 279-298 (vid. págs. 12, 13).