Universidad de Alcalá

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

"BIOPELÍCULAS Y BIORREMEDIACIÓN"

Autor: Morato Sánchez, María Noelia

Tutor: Soliveri de Carranza, Juan

2022

Índice:

1. Introducción 1
1.1. Objetivos 4
2. Materiales y métodos 4
3. Resultados y discusión 4
3.1. Biopelículas 4
3.2. Biorremediación 7
3.2.1. Biorremediación según el contaminante 8
3.2.1.1 Aguas residuales y lixiviados de la agricultura 8
3.2.1.2 Metales pesados 13
3.2.1.3 Hidrocarburos 15
3.2.1.4 Compuestos orgánicos 19
3.2.2. Factores a tener en cuenta 20
3.3. Discusión de los resultados 22
4. Conclusiones 24
5. Referencias bibliográficas 26

Resumen

La contaminación a nivel mundial por la actividad antrópica aumenta día a día, constituyendo un problema de primer orden y siendo el agua uno de los recursos que más se ve afectado. Para mitigar su efecto se han desarrollado diferentes tratamientos, como es el caso de la biorremediación. Esta tecnología, basada principalmente en el uso de microorganismos, es una posible solución gracias a las ventajas que tiene frente a otro tipo de tratamientos. Por ello, el Trabajo Final de Grado que presentamos tiene como objetivo realizar una compilación bibliográfica en la que se recoja información sobre cómo tratar mediante biorremediación diferentes contaminantes presentes en el recurso hídrico, en particular utilizando biopelículas.

Concretamente se revisan los conceptos de contaminantes, biorremediación y biopelículas, así como la formación y desarrollo de estas últimas. En cuanto contaminantes, se exponen los que tienen un mayor impacto a nivel global, sus orígenes y su estructura. En cada uno de ellos se hace hincapié sobre la mejor forma de tratarlos, siempre desde el punto de vista de las biopelículas y de los microorganismos que mejor se adapten a cada una de las circunstancias. Asimismo, se revisan los factores que afectan al proceso, ya sean intrínsecos al contaminante, a los microorganismos o al ambiente. Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas con esta revisión y, las ventajas y desventajas de este método de biorremediación frente a otros físicos o químicos.

Palabras clave: biorremediación, biopelículas, contaminantes, recurso hídrico, microorganismos, factores ambientales.

Abstract

The worldwide pollution increases daily due to human activity, is a major problem, being the water one of the most affected resources. To mitigate this global problem there are different treatments such as bioremediation. This is a suitable solution to the pollution problem thanks to its advantages over other treatments. For this reason, this project consists in carrying out a bibliographical compilation about how to treat different contaminants in water resource through biofilms.

Specifically, the concepts of contaminants, bioremediation and biofilms are reviewed, as well as their formation and development. In terms of contaminants, those that have a huge impact at a global level, are exposed, including their origins and structure. In each of them, the emphasis is placed on the best way to treat them; always from the point of view of the biofilms and the microorganisms, that fits best to each circumstances. Likewise, all the factors that affect this process are reviewed, whether they are intrinsic to the contaminant, to the microorganisms or to the environment. Finally, the conclusions obtained with this review are presented, along with the advantages and disadvantages of the bioremediation method comparing it to other physical or chemical ones.

Keywords: bioremediation, biofilms, pollutants, water resources, microorganisms, environmental factors.

Keywords: bioremediation, biofilms, pollutants, water resources, microorganisms, environmental factors.

1. Introducción

La revolución industrial iniciada en el siglo XVIII ha traído consigo un crecimiento poblacional e industrial que conlleva una elevada exigencia de recursos y una gran presión sobre el medio ambiente (Aparicio, 2013). Desde entonces, la población mundial ha aumentado de forma exponencial, hasta alcanzar la cifra de 7.761.620.150 habitantes en 2020 y, según el Banco Mundial, superar los 11 mil millones de habitantes en 2100 (ver *Figura 1*) (Burgos, 2018). Como hemos comentado, el aumento continuo de población supone en general una demanda de recursos creciente, pero también hay que tener en cuenta los cambios de hábitos sociales. Un ejemplo de esto último es el aumento del consumo de carne, que pasó de ser de 34 kg anuales de media por persona en 1992 a 43 kg en 2007 (PNUMA, 2011).

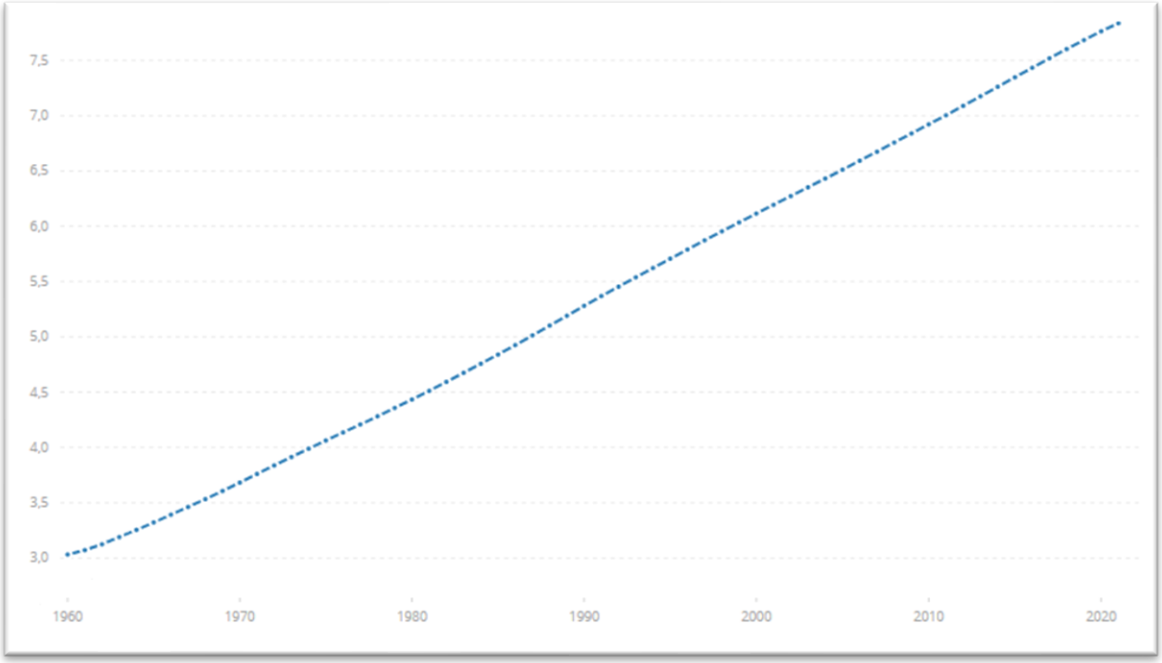

Figura 1. Crecimiento de la población mundial. Tomado del Banco Mundial, 2020. El eje abscisas representa los años en los que se toma los datos de población y el eje de ordenadas muestra la población mundial en millones de habitantes.

Esta situación genera impactos con consecuencias ambientales, algunas a nivel global, como es el cambio climático. Una de las principales causas son los contaminantes resultantes de la actividad antrópica, que son liberados al medio ambiente, alterándolo y afectando a todos los seres vivos, incluidos los seres humanos.

Para poder actuar hay que comprender qué son los contaminantes. Se definen como aquellos compuestos o formas de energía que modifican el medio e incluso pueden dañarlo junto a los seres vivos que habitan en él (RAE, 2021). Estos compuestos se pueden encontrar en todo el planeta, pero en esta compilación bibliográfica se va a hacer un especial hincapié en aquellos que se pueden apreciar en la hidrosfera.

El agua representa uno de los recursos más valiosos para la vida y, como el resto, se ha visto influenciado y dañado de diversas maneras por la actividad antrópica, encontrándose cada vez más contaminado con el paso del tiempo (ONU, 2010).

Un ejemplo de contaminante serían las aguas residuales de origen doméstico o industrial, las cuales presentan una alta concentración de nitrógeno y fósforo, pudiendo dar lugar al crecimiento desmesurado de microorganismos, bajos niveles de oxígeno y eutrofización (Guanin y Reatiqui, 2022). Cabe destacar que esta situación también suele producirse a raíz de los vertidos de lixiviados de los productos químicos utilizados en la agricultura, ya que contienen una elevada concentración de nutrientes (Granada y Prada, 2015).

Continuando con la agricultura, es preciso mencionar que algunas prácticas, como el uso de fertilizantes o el riego con agua contaminada, puede suponer una liberación de metales pesados. Esta cuestión trae consigo problemas de salud y en la alimentación, debido principalmente a su bioacumulación en los seres vivos, preocupando mayoritariamente su presencia en pescado, carne y en algunos cultivos como, por ejemplo, el arroz (Reyes, 2016).

Además de los vertidos domésticos y agrícolas, también son muy importantes aquellos de origen industrial. Estos pueden proceder de la propia actividad, como por ejemplo las curtidoras, donde el agua se suele contaminar con azufre y cromo (Rosales, 2018), pero también pueden ser producidos de forma indirecta, como en el transporte de los materiales, materias primas y/o productos finales. En este último caso, tienen un gran impacto los vertidos de petróleo que se producen de manera accidental dañando gravemente los ecosistemas marinos (Pérez *et al*., 2018).

Otra consecuencia del aumento de la actividad industrial y de la producción de bienes de las últimas décadas son los residuos de plástico. Este material se encuentra disperso a nivel mundial, pero tiene gran afección en las zonas marítimas, donde suscita una mayor preocupación su forma fragmentada, los microplásticos, que como en el caso de los metales pesados, también pueden comprometer la seguridad alimentaria, además de alterar el entorno (Ivar do Sul y Costa, 2014).

Estos contaminantes y sus problemáticas requieren de una solución, es ahí donde intervienen los microorganismos, ya que se podrían utilizar su actividad metabólica para eliminarlos. Para ello, es fundamental conocer la trayectoria histórica de la Microbiología y ahondar en su investigación.

La historia de la Microbiología comienza con la creación del microscopio, permitiendo observar y estudiar estas minúsculas formas de vida, denominadas animálculos, en el siglo XIX. Con el paso del tiempo se fueron perfeccionando los instrumentos y las técnicas de estudio, desarrollando los medios de cultivo selectivos para el aislamiento y el cultivo puro de microorganismos (CIHAC, 2021).

El desarrollo de la Microbiología ha permitido un conocimiento creciente en este campo y con ello, ha cobrado un importante papel en diversos sectores como la alimentación, la salud o la descontaminación a través de la biorremediación (CIHAC, 2021), siendo la biorremediación el proceso a través del cual se tratan los contaminantes mediante la acción metabólica de los microorganismos (Brutti *et al*., 2018). En el caso de los microorganismos, el proceso se ve enriquecido en comunidades mixtas en las que se coordinan distintas especies con diferentes exigencias metabólicas, como por ejemplo en el caso de las biopelículas. En este caso se trata de comunidades complejas, englobadas en una misma matriz extracelular polimérica y con cualidades que les confieren una gran resistencia. Por sus características pueden ser ideales para tratar el medio en condiciones inhóspitas y eliminar los contaminantes (Betancourth *et al*., 2004).

1.1. Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es reunir información sobre las biopelículas y su funcionamiento, profundizando en la adecuación de las mismas para la biorremediación de diferentes contaminantes, con la finalidad de estudiar su utilidad y su grado de desarrollo e implantación, y ahondar en una de las posibles soluciones para este grave problema global.

2. Materiales y métodos

Para la realización de esta compilación bibliográfica se ha procedido al planteamiento de preguntas y objetivos, a una búsqueda y revisión bibliográfica y, posteriormente, a una selección de datos con los que posteriormente trabajar. Este procedimiento se ha inspirado en el método de *Kitchenham* (Kitchenham, 2004).

Los buscadores que se han utilizado son Scielo, Web of Science, Dialnet, Google Scholar, PubMed y el buscador de la biblioteca *online* de la Universidad de Alcalá (UAH). En cuanto a los criterios de búsqueda, en los buscadores se han consultado palabras clave y conceptos relacionados con el tema a tratar, tanto en español como en inglés. Algunos de ellos son: contaminantes, biopelículas, biorremediación, recurso hídrico, etc. Utilizando conectores booleanos, tales como “y” u “o”, en los casos necesarios.

De los resultados de las consultas se han revisado principalmente artículos científicos, libros, Trabajos de Fin de Grado Y Tesis Doctorales, de los cuales se ha tenido en cuenta el año de publicación, siendo éste lo más reciente posible. Para ver la adecuación del contenido de los artículos se ha procedido a la lectura del resumen o *abstract*, así como de los resultados y conclusiones. Asimismo, se han consultado páginas web de entidades oficiales de forma puntual, todo ello con la finalidad de obtener la información más actual y completa posible.

3. Resultados y discusión

3.1. Biopelículas

Una biopelícula es una comunidad compleja de microorganismos que viven agregados entre sí y adheridos a una superficie, gracias a una matriz

extracelular polimérica que ellos mismos secretan. Dentro de este mismo conjunto de microorganismos se produce una organización y su diferenciación para realizar distintas funciones (Betancourth *et al*., 2004).

Este tipo de comunidades permiten un mejor aprovechamiento de los recursos y una mayor probabilidad de supervivencia ante inconveniencias y en medios inhóspitos, en comparación de los organismos de vida libre. Por dicho mismo motivo, las biopelículas representan la forma de vida más común entre los microorganismos (Olarte y Cristiano, 2021).

La formación de una biopelícula se inicia con la unión entre un microorganismo y una superficie. Con el tiempo se produce el crecimiento y división del microorganismo dando un pequeño grupo de individuos al cual se pueden unir otras especies. Esto provoca una adhesión cada vez más fuerte con la superficie debido a la secreción de la matriz extracelular. Esta matriz con textura mucosa actúa como enlace entre los microorganismos y está formada por polisacáridos, ADN y proteínas (Harrison *et al*., 2006).

Finalmente, una vez que la biopelícula alcanza la madurez, se produce el desprendimiento de algunos de sus microorganismos, que se desplazan por el medio, en este caso por el fluido, llegando formar nuevas colonias siempre y cuando encuentren una superficie adecuada a la que adherirse, tal y como se muestra en la *Figura 2* (Harrison *et al*., 2006).

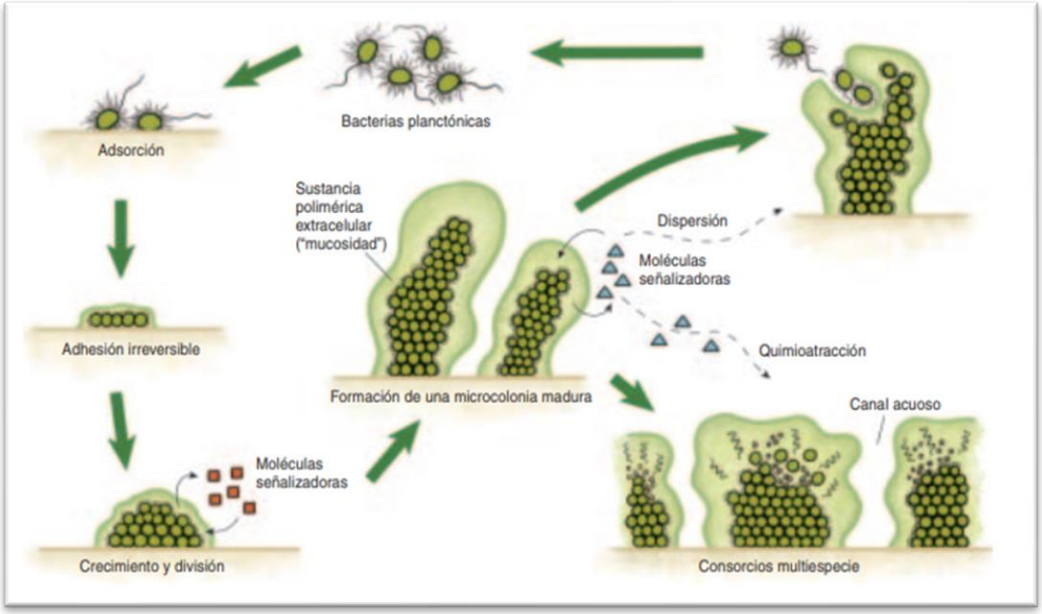

Figura 2. Formación de las biopelículas. Tomado de Harrison et al., 2006.

Esta estructura permite que haya comunicación interna en la colonia. Para ello, se utilizan canales que conectan todas las zonas, donde a través de ellos se transportan nutrientes y sustancias químicas, como por ejemplo las moléculas de señalización. Uno de los procesos más llamativos de la comunicación intracelular es el *quorum sensing* (Olarte y Cristiano, 2021), que permite una rápida comunicación en la colonia ante cualquier estímulo, siempre y cuando esta cuente con un elevado número de microorganismos. Se debe a que se necesita una concentración mínima de moléculas que participan en la comunicación intercelular, con objeto de que se unan a los receptores celulares, es decir, se necesita una densidad poblacional mínima.

Para determinar si la densidad poblacional es suficiente se produce la *percepción del quórum*, lo cual se realiza con señales moleculares. Si el *quórum* es el correcto, las moléculas se unen a los receptores de los microorganismos destinatarios, desencadenando la expresión de genes que dan lugar a respuestas concretas, como, por ejemplo, excretar una sustancia relacionada con un mecanismo de defensa o la producción de una determinada enzima (*Harrison et al*., 2006).

Los microorganismos que conforman estas comunidades, tal y como se ha mencionado anteriormente, pueden pertenecer a una especie o a varias. Cierto es que cuando se dan las condiciones para que conviva una amplia diversidad de especies, las biopelículas presentan una mayor resistencia ante estrés ambiental, como la luz UV o desecación (Loera *et al*., 2012) o ante sustancias tóxicas, como por ejemplo podrían ser algunos medicamentos o metales pesados (Harrison *et al*., 2006).

Uno de los motivos de la resistencia se debe a que para poder eliminar enteramente la biopelícula habría que dañar toda la estructura que la conforma, ya que, si solo se daña superficialmente, los microorganismos en el centro de la comunidad no se verían afectados (Betancourth *et al*., 2004). Asimismo, esta resistencia se ve favorecida por la diferenciación reproductiva y la reserva energética (Loera *et al*., 2012).

Otra cualidad son las interacciones sinérgicas entre especies que permiten gestionar y aprovechar de manera más eficiente los recursos, ya que

los residuos metabólicos de unas especies son las fuentes de carbono o energéticas de otras. Además, estas interacciones pueden conllevar la transferencia de material genético.

La capacidad de aprovechamiento de los recursos es muy importante ya que, en un ambiente natural a pequeña escala como es el caso de los microorganismos, es muy difícil encontrar oxígeno o nutrientes distribuidos de manera homogénea y en grandes cantidades. Por lo tanto, aunando todo lo anterior, se constata que los microorganismos se encuentran en ambientes heterogéneos y fluctuantes, ya que los nutrientes principales o el oxígeno pueden agotarse rápidamente y se tendría que buscar otra fuente de energía para que la colonia pueda subsistir (Harrison *et al*., 2006). Estos microambientes dan lugar a diferentes nichos ecológicos, requiriendo de una comunidad heterogénea para su aprovechamiento y es en este punto es donde destaca la diversidad de la biopelícula (Betancourth *et al*., 2004). Asimismo, cabe destacar que estos cambios en las condiciones ambientales provocan modificaciones en la estructura y composición de las biopelículas (Mora y Bravo, 2017).

El papel de las biopelículas en la biorremediación consiste en metabolizar los contaminantes en su provecho, y así eliminarlos del medio al pasar a formar parte de su biomasa o bien, alterándolos con la finalidad de obtener energía, liberándolos de nuevo al medio en una forma menos tóxica.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, las biopelículas constituyen una buena herramienta para la biorremediación, al encontrarse de forma natural en el medio, por su resistencia, su capacidad y variabilidad metabólica. Además, es importante considerar que se trata de un método económico con el que actuar frente a la contaminación, además, se puede realizar *in situ* y sin muchos requerimientos energéticos, a diferencia de otros métodos como, por ejemplo, la incineración (Di Paola y Vicien, 2010).

3.2. Biorremediación

La remediación de contaminantes es la eliminación o transformación de sustancias perjudiciales para el medio a otras que lo sean menos (Betancourth *et al*., 2004). La biorremediación consiste en llevar a cabo dicha transformación empleando seres vivos. En el caso de esta se produzca con microorganismos,

dicha transformación se realiza a través de su actividad metabólica. Por ello, dependiendo de la naturaleza del contaminante se necesitan unas especies u otras para poder degradarlo.

La biodegradación ha sido usada desde el año 600 A.C por los romanos para el tratamiento de aguas residuales en los sistemas de alcantarillado (Arenas, 2018). Hoy en día es una técnica en auge para eliminar contaminantes debido a sus diversas ventajas.

3.2.1. Biorremediación según el contaminante

Alrededor de todo el planeta existen numerosos contaminantes. En esta investigación bibliográfica se va a describir el tratamiento de alguno de ellos, basándonos en su impacto a escala global: aguas residuales domésticas e industriales, lixiviados agrícolas, metales pesados, hidrocarburos y compuestos orgánicos (Cota *et al*., 2018).

3.2.1.1. Aguas residuales y lixiviados de la agricultura

Las aguas residuales de origen doméstico están compuestas, entre otros, por materia orgánica y material mineral en proporciones similares. A su vez, estos compuestos están en un medio acuoso y solo parte de ellos se encuentran disueltos. Además, en estos residuos también se puede encontrar con frecuencia contaminación por nitrógeno, fósforo y patógenos y, en menor medida, otros contaminantes como los metales pesados o químicos específicos, sobre todo si son de origen industrial. El tratamiento habitual de las aguas residuales normalmente se realiza en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). En las EDAR este procedimiento se agrupa en tres etapas. La primera etapa, es un tratamiento que consiste mayoritariamente en la eliminación de materia orgánica por sedimentación o filtración, un tratamiento biológico secundario y el tratamiento terciario que consiste en una complementación de los anteriores para eliminar lo máximo posible los contaminantes (Rojas, 2002).

En el tratamiento secundario se utiliza el cultivo microbiano para que, a través de su metabolismo, se transforme la materia orgánica en otros compuestos como dióxido de carbono, metano o nutrientes inorgánicos. Para ello, se expone el residuo a las comunidades microbianas (Betancourth *et al*., 2004). Esto se realiza a través de unas infraestructuras denominadas reactores

biológicos. Son grandes tanques donde el agua residual contacta con microorganismos y nutrientes (Arenas, 2018). Entre las propuestas para mejorar este tipo de tratamiento están la utilización de piezas, láminas u otros soportes para la formación de biopelículas en ellas y así obtener una mayor degradación.

Los biorreactores pueden ser de diferentes tipos, de lecho móvil y de lecho fijo. En el primer caso, las biopelículas se encuentran adheridas a material, normalmente plástico, que bien está en suspensión o que se mueve en el reactor. Este tipo de mecanismo puede ser tanto aerobio como anaerobio, en el primero se aprovecha el movimiento de la aireación mientras que, en el segundo, el movimiento se produce de forma mecánica en el tanque como, por ejemplo, con el uso de turbinas (Quintero, 2021) (consultar *Figura 3*).

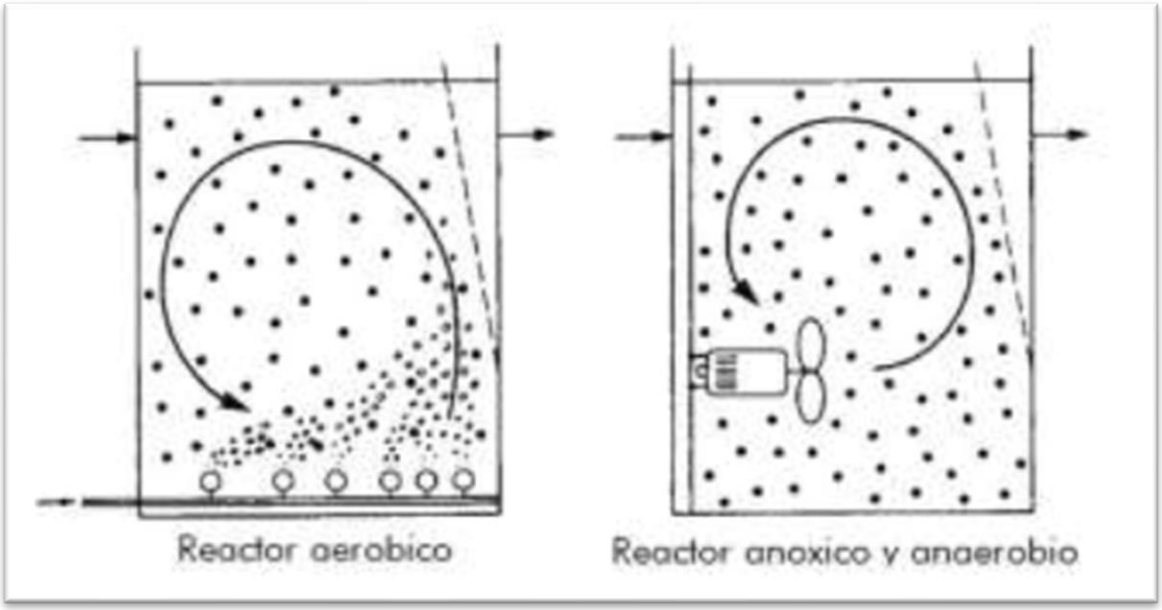

Figura 3. Reactor de lecho móvil aerobio y anaerobio. Tomado de (Quintero, 2021).

Asimismo, se considera un reactor de lecho móvil de tipo película suspendida, aquel que no consta de un material en el que se fija la biopelícula, pero el contenido del reactor se somete a una aireación que no permite la estabilización del fluido, aumentando la interacción entre residuo y microorganismo (Quintero, 2021).

En los reactores de lecho fijo (ver *Figura 4*), las biopelículas están adheridas a materiales, pero estos no se mueven. El contacto entre los microorganismos y el fluido se puede mejorar a través de aireación ya que permite el movimiento del residuo.

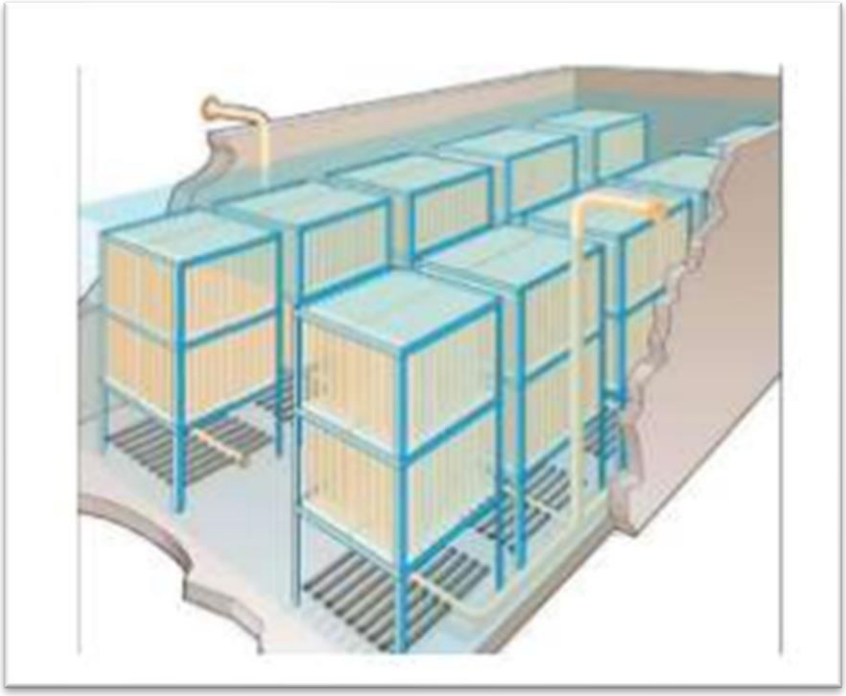

Figura 4. Reactor de lecho fijo. Tomado de Quintero, 2021.

Como se ha mencionado, en estos reactores, para favorecer la formación de biopelículas microbianas se añade pequeñas piezas de materiales, como el polietileno de alta densidad o plásticos porosos, ya que permiten el crecimiento microbiano en ellos. Como consecuencia, en este tipo de reactores se desarrollan satisfactoriamente los microorganismos sobre las piezas, permitiendo la degradación de fósforo cuando hay grandes concentraciones de materia orgánica y de esta misma materia. Por otro lado, la oxidación del nitrógeno es menor con grandes cantidades de materia orgánica, que además también provoca una gran demanda química de oxígeno (DQO) (González *et al*., 2002). En el caso de ser una degradación anaerobia se obtiene metano, el cual puede utilizarse como fuente energética. Además, los sólidos restantes se pueden secar y utilizar como abono (Betancourth *et al*., 2004).

Otra manera de enfocar el tratamiento secundario consiste en la utilización consorcios de cianobacterias y microalgas, con la finalidad de eliminar la contaminación resultante del tratamiento secundario y producir una biomasa de algas con interés industrial como biocombustible (Corso, 2022). A diferencia del caso anterior, en un principio se requiere de un menor gasto energético porque los microorganismos están en suspensión sin necesidad de una

remoción constante, pero en cambio es necesario que haya un mínimo de energía lumínica (Tripathi y Kumar, 2017).

La acción conjunta de estas especies provoca una gran degradación, ya que las bacterias son las encargadas de metabolizar la materia orgánica para liberar los nutrientes y el CO_2 que utilizan las microalgas, del mismo modo, el oxígeno producido por las algas es utilizado por bacterias que utilizan la materia orgánica como fuente de carbono (Tripathi y Kumar, 2017). Con ello, en conjunto se degrada principalmente fosfato, ya que lo acumulan en forma de polifosfatos como reservorio energético y nitrógeno inorgánico que lo degradan por translocación a través de la membrana plasmática para la formación de aminoácidos.

Según el estudio que realizó León en 2021, con este método se podría llegar a la eliminación del 86% de nitrógeno y el 98% de fósforo. También hay que tener en cuenta que de forma secundaria estos microorganismos acumulan, aunque en menor proporción, otros elementos como K, Na, Mg, Ca, Fe, Mn y Zn, debido a que son necesarios para su desarrollo en pequeñas cantidades.

Una controversia con este tipo de tratamiento es la recolección de biomasa, puesto que al estar los microorganismos en suspensión resulta muy laboriosa. Este problema se puede solucionar realizando una inmovilización de los microorganismos en unas láminas adhesivas. A través de su filtración, en ellas se formarían las biopelículas y ya no sería un tratamiento con microorganismos en suspensión (León, 2021).

En general los biorreactores que poseen biopelículas en vez de microorganismos en suspensión, presentan una menor laboriosidad a la hora de recoger la biomasa producida, una reducción de microorganismos en suspensión, una mayor concentración de microorganismos, menor necesidad energética y, en conclusión, un ahorro económico (Fernández *et al*., 2014).

Además de los mencionados, se pueden encontrar otros sistemas donde se cultivarían las algas usando el residuo que ya ha sido tratado por las bacterias. Estos sistemas constan de biopelículas que se encuentran en soportes fijos, móviles o flotantes. El primero consta de unos paneles al aire en los que está la biopelícula y sobre los cuales fluye el residuo. En cambio, un ejemplo de sistema

móvil consiste en paneles unidos a una cuerda la cual se enrolla y se desenrolla para sumergir y airear regularmente el panel. Por otro lado, los sistemas flotantes son discos con microorganismos que giran sobre la superficie del medio (Fernández *et al*., 2014).

Algunas de las especies que destacan en este tipo de biorremediación son *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus dimorphus* por la eliminación de nitrógeno y fósforo del medio, y *Tetraselmis* sp*., Chlamydomonas* sp*.* y *Nannochloris* sp. por su gran tolerancia al CO_2 (Candela, 2016).

Hasta ahora se han mencionado casos donde la degradación se produce de manera aerobia. Una opción para realizarla de manera anaerobia es mediante la utilización de microalgas clorofitas, como por ejemplo *Chlorella vulgaris* o *Sphaerocystis* sp., ya que presentan una mayor tolerancia en este tipo de medios. Asimismo, la degradación se produce de una manera más eficiente cuando las biopelículas son mixtas en cuanto a las especies y si, además, el medio tiene una alta temperatura (Candela, 2016).

La producción de biomasa de cianobacterias y las microalgas no es el único método con el que obtener un recurso energético procedente de la biorremediación, debido a que las aguas residuales de origen industrial y doméstico también pueden ser empleadas como fuente de energía en celdas de combustible microbianas. Para ello, la biopelícula situada en la celda contiene microorganismos electrogénicos, como por ejemplo algunas cepas de *Deltaproteobacteria*, capaces de transferir electrones desde el residuo al ánodo obteniendo energía. Aunque la energía resultante sea de baja potencia, es un método económico al no ser necesaria su aireación. Además, hay que tener en cuenta que la eliminación del residuo se produce de forma más rápida que si realizara de forma natural debido a que el electrodo actúa como catalizador (Mora y Bravo, 2017).

Las aguas residuales domésticas no son la única forma en que el ser humano contamina los recursos hídricos. Como hemos comentado anteriormente, los lixiviados provenientes de la agricultura contaminan debido a la utilización de fertilizantes y productos químicos, ya que gran parte de ellos no son incorporados por las plantas (Rivas, 2019). La utilización de fertilizantes y

estiércol animal conlleva una alta concentración de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales y, en cambio, una menor cantidad de carbono. Esto, junto a la presencia de tóxicos, podría dificultar el desarrollo de las algas y cianobacterias, si se intentara tratar igual que en el caso de las aguas residuales domésticas (León, 2021).

Para evitar estas adversidades se puede acudir a fomentar el desarrollo de los microorganismos mediante la bioestimulación, consistente en la adicción de nutrientes y/o bioventeo o *bioventing* mediante la inyección de oxígeno, o con la ayuda de la bioaumentación, que consiste en la introducción de cepas de microorganismos al medio, en este caso capaces de degradar los contaminantes para facilitar su eliminación (God, 2020). Una alternativa es el uso de biofiltros que pueden compensar la falta de carbono, añadiendo materiales, como por ejemplo algodón (Aloni y Brenner, 2017). Algunos de los géneros de microorganismos que se utilizan para la descontaminación de lixiviados agrícolas son *Chlorella, Scenedesmus, Synechocystis* y *Pediastrum* (God, 2020).

Por otro lado, las aguas residuales industriales varían mucho en su composición dependiendo de la actividad que se esté llevando a cabo. Generalmente si las comparamos a las de origen doméstico suelen tener menos nutrientes como el nitrógeno y oxígeno, pero sí mucha más materia orgánica y metales. Lo cual, supone una mayor demanda biológica de oxígeno (DBO), DQO y unos niveles más altos de toxicidad. Por ello, se deberían utilizar especies adaptadas a los requerimientos de los residuos, resistentes su toxicidad y a la limitación de nutrientes (León, 2021). Por ejemplo, para tratar aguas contaminadas con metales pesados se utilizan microalgas, como *Scenedesmus quadricauda, Chlorella miniata, Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana*. Asimismo, dos de estas especies, *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp., *t*ambién son capaces de eliminar de forma eficiente fósforo y nitrógeno en medios con poca carga de materia orgánica, tal como ocurre en los efluentes de la industria pesquera (Candela, 2016).

3.2.1.2. Metales pesados:

Los metales pesados son aquellos metales y metaloides con elevadas densidades y masa atómica mayor de 20, además de ser tóxicos a bajas

concentraciones, debido a su facilidad para atravesar membranas y a su alta afinidad por diversas moléculas, entre ellas las proteínas, tiene el problema añadido de su persistencia (Fernández *et al*., 2020). Además, hay que tener en cuenta de que la forma en la que se encuentre el metal influye mucho en su toxicidad. Por ejemplo, en el caso del mercurio es mucho más tóxico en su forma orgánica, es decir, el metilmercurio; o en el caso del uranio, cuya toxicidad depende de su estado de oxidación (Yagnentkovsky, 2011).

Desde el punto de vista de los microorganismos, hay que considerar que los metales pesados también pueden ser tóxicos para ellos mismos, por lo tanto, para la biorremediación se utilizan aquellos que son tolerantes e indiferentes a la presencia del metal, ya que poseen mecanismos para su eliminación (Yagnentkovsky, 2011).

Los metales pesados deben su toxicidad a la carga que presentan, ya que con ella ionizan los cationes. Las biopelículas, presentan una gran tolerancia a estos compuestos, debido a que son capaces de neutralizarlos cambiando su estado redox al expulsar otros iones, o capturando y almacenando los metales pesados (Cervantes, 2006). Por ejemplo, se podría proceder a la reducción de cromo utilizando diferentes cepas de *Pseudomonas, Bacillus altitudinis* o *Enterobacter cancerogenus* (Ceron, 2021).

Cabe destacar que el método más importante para la eliminación de metales del medio acuático es la adsorción de éstos por parte de las superficies celulares de los microorganismos que conforman el consorcio microbiano, ya que por presentar numerosos carbohidratos y exopolisacáridos con carga negativa (Tripathi y Kumar, 2017).

El problema que acarrea esta técnica de bioremediación es el efecto que pudieran tener los metales pesados el correcto desarrollo de los microorganismos, por ejemplo, inhibiendo la fotosíntesis en las microalgas al unirse al centro activo enzimático. Por ello, es importante construir una comunidad adaptada a este tipo de situaciones y que pueda hacer frente al tóxico de manera conjunta (Tripathi y Kumar, 2017).

Revisando casos concretos, para el uranio se utilizaría un consorcio donde las algas adsorberían el uranio, posteriormente tras la muerte de las

microalgas estas serían degradadas por las bacterias y reduciría el uranio contenido en la materia orgánica de U(VI) a U(IV). Utilizando el mismo tipo de comunidades se podría alcanzar una eliminación por biosorción del 80% de cobre y 100% de cadmio con algunas especies ya mencionadas anteriormente, como *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. (Tripathi y Kumar, 2017).

Para otros metales se utilizan filtros. El material vitrocerámico es ideal para este tipo de filtros ya que es capaz de retener metales pesados, pero no solo eso, sino que también permite el crecimiento de microorganismos en su superficie, como *Escherichia coli.* En un artículo de Gracía *et al.* (2004), se plantea el uso de este tipo de biofiltro para tratar aguas contaminadas con cadmio y plomo, consiguiendo retener un 98% y 39%, respectivamente. La gran resistencia de *E. coli* a estos metales se debe a la producción de determinadas enzimas, entre ellas la superóxido dismutasa, que permite tolerar una mayor concentración de estos metales respecto a otros microorganismos.

Otra forma de inmovilización de los metales pesados con microorganismos es la bioprecipitación. En este proceso los microorganismos producen metabolitos, como por ejemplo los sulfuros que generan las bacterias sulfatoreductoras, que permiten precipitar los metales (Yagnentkovsky, 2011).

A parte de la inmovilización de los metales también se puede proceder a su movilización, es decir, solubilizarlos o transformarlos para que sean extraídos fácilmente del medio. Tres procesos que favorecen la movilización de los metales son la biolixiviación, la quelación y la metilación (Yagnentkovsky, 2011).

La biolixiviación es la solubilización de los metales gracias a microorganismos, como por ejemplo utilizando *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans*. La quelación es la generación de complejos estables con metales, para ello los microorganismos generan agentes que se unen a los metales. En cuanto a la metilación, consiste en la mediación de bacterias y hongos para transferir grupos metilo a los metales (Yagnentkovsky, 2011).

3.2.1.3. Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos formados con hidrógeno y carbono. Concretamente el contaminante que se va a valorar es el petróleo que se

compone principalmente por hidrocarburos, con un contenido de 82–87% de carbono y un 11,7–14, 7% de hidrogeno (Arenas, 2018).

Si se introduce en grandes cantidades en el medioambiente lo pueden alterar considerablemente, ya que los hidrocarburos presentan un carácter recalcitrante debido a su persistencia, apolaridad y bioacumulación en el medio. La problemática que causan en el medio acuático se debe a la diferencia de densidades y su insolubilidad, creándose una capa opaca que impide el paso de la luz y oxígeno, afectando a todo el ecosistema (Vázquez, 2019). En concreto, afectan a la mayoría de los microorganismos de manera negativa, ya que son compuestos tóxicos que, además, como ya hemos comentado, pueden generar condiciones desfavorables. Pero para alguno esta situación es favorable, esto ocurre para aquellos capaces de sobrevivir en estas condiciones tan adversas y con altos niveles de toxicidad y que, a su vez, son capaces de usar los hidrocarburos como sustrato (Arenas, 2018).

La persistencia de estos compuestos depende de la estructura que presenten, llegando a ser difíciles de degradar. Para empezar, se pueden distinguir compuestos con cadena lineal o cíclicos. Dentro de los de cadena lineal, aquellos que presentan mayor resistencia son los hidrocarburos alifáticos de cadena larga o muy corta. Por otro lado, tanto en los de cadena lineal, como en los cíclicos, se degradan con mayor dificultad aquellos que presenten mayor número de ramificaciones, sustituciones halogenadas o dobles y triples enlaces, (Calvo, 2017) (consultar *Figura 5*).

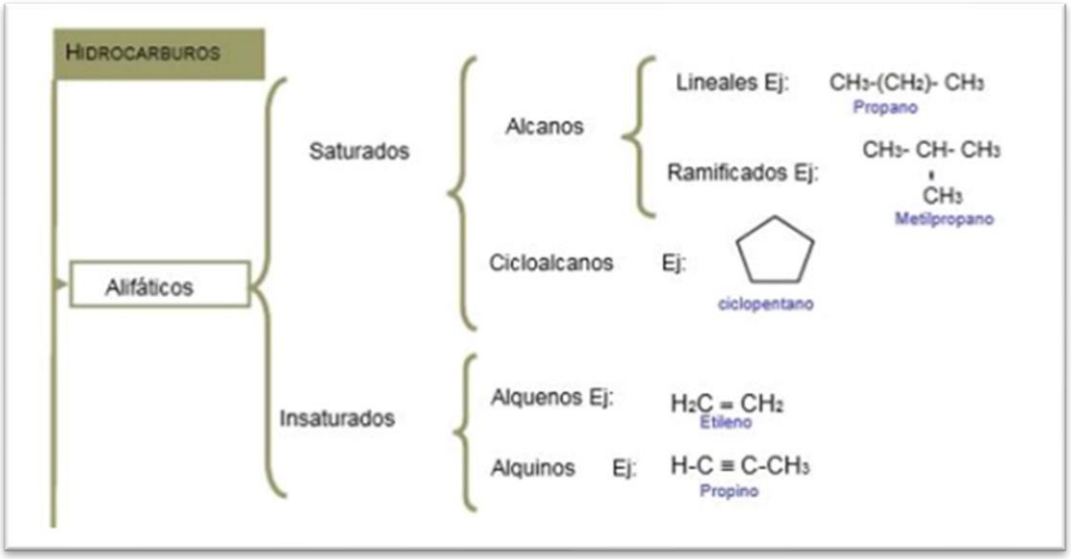

Figura 5. Tipos de hidrocarburos. Tomado de (Arenas, 2018).

En el caso de los que tienen cadena lineal, aquellos sin enlaces dobles ni triples se denominan alcanos que se degradan con mayor facilidad que los alquenos, que presentan doble enlace, que a su vez se degradan a una mayor velocidad que los alquinos, que presentan un triple enlace. También hay que tener en cuenta que dentro de los hidrocarburos cíclicos se encuentran los aromáticos (ver *Figura 6*), que se componen por anillos de 6 carbonos con tres enlaces dobles y tres simples. El número de anillos en su estructura es variable, cuantos más anillos tengan más difíciles son de degradar (Calvo, 2017).

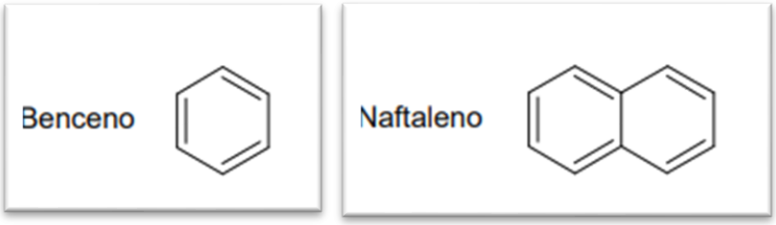

Figura 6. Hidrocarburos aromáticos. Tomado de Calvo, 2017.

Los hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo y sus derivados, ya que éste está compuesto en gran proporción por hidrocarburos aromáticos y alifáticos saturados, es decir, cadenas abiertas con enlaces simples (Calvo, 2017). La degradación de hidrocarburos ocurre principalmente por comensalismo y reacciones cometabólicas, siendo el comensalismo la asociación de dos microorganismos para su beneficio mutuo y, el cometabolismo, cuando una especie de microorganismo tiene enzimas inespecíficas que degradan un contaminante sin que haya intención de ello y otra especie se puede aprovechar. En concreto se suelen asociar especies de microalgas y cianobacterias con bacterias oxidantes (Tripathi y Kumar, 2017).

La contaminación con estos compuestos se puede producir por vertidos accidentales puntuales o por lixiviados continuos a lo largo del tiempo por actividades industriales. Para evitar estos últimos se pueden tratar las aguas contaminadas con biorreactores que contienen material absorbente que incluyen consorcioss microbiano. A través de este proceso de bioaumento, esta microbiota, junto a la que hay presente en el agua contaminada, actúan en conjunto para degradar los hidrocarburos, llegando a eliminar más del 90% de los hidrocarburos y su completa eliminación, tras un ciclo de recirculación (Calvo, 2017).

Los hidrocarburos pueden ser degradados por diversos tipos de microorganismos, desde bacterias hasta hongos, levaduras y algas. Debido a que el residuo es insoluble, para su tratamiento se utilizan biopelículas con bacterias oxidantes, ya que son capaces de adherirse y dispersar el residuo. Entre ellas se encuentran cepas de *Pseudomonas* y *corinebacterias*. (Betancourth *et al*., 2004). Otros géneros capaces de degradar los hidrocarburos son *Acinetobacter, Gordoia, Brevibacterium, Aeromicrobium, Dietzia*…etc, destacando los géneros *Arthrobacter, Burkholderia, Mycobacterium* y *Pseudomonas*, entre otros, en la degradación de hidrocarburos aromáticos (Calvo, 2017).

En cuanto a los vertidos accidentales de petróleo, son un foco de preocupación, ya que aumentan cada año a pesar de las prevenciones (Calvo, 2017). Ejemplo de ello es el derrame de gran magnitud del pozo Macondo en el Golfo de México que se produjo en 2010, o a nivel nacional el accidente del Prestige en 2002 (Arenas, 2018).

Las *Pseudomonas* son un grupo de bacterias de gran diversidad metabólica (Rodríguez, 2015), capaces de sobrevivir en ambientes extremadamente contaminados y metabolizar contaminantes difíciles de degradar. Asimismo, presentan con resistencia a diferentes condiciones térmicas y altas concentraciones de salinidad. Las *Pseudomonas* son capaces de degradar los hidrocarburos, en especial los hidrocarburos aromáticos policíclicos e hidrocarburos alifáticos, utilizándolos como donadores de electrones. Como resultado, se obtienen compuestos cada vez más simples, hasta que llegan a ser moléculas de dióxido de carbono y agua, que pueden utilizar como fuente de biomasa o energía al incorporarlas en forma de carbono e hidrógeno (Arenas, 2018).

Además, esta biodegradación se puede realizar de manera natural con bastante eficacia, ya que las bacterias autóctonas producen metabolitos que les ayudan a tener un mayor acceso al petróleo. Entre ellos se encuentras los ramnolípidos que son biosurfactantes que generan cambios en la hidrofobicidad y en la tensión superficial, permitiendo la formación de biopelículas alrededor de la capa de petróleo. Pero esta degradación puede mejorarse considerablemente, gracias a procesos de bioaumentación, bioestimulación y *bioventing* (Vázquez,

2019). En cuanto a la eficacia, la diferencia es notoria si se compara la degradación con bacterias autóctonas sin estimulación, que sería de hasta el 62%, a la degradación con estimulación, que aumentaría hasta un 70% (Arenas, 2018).

Dentro del grupo de las *Pseudomonas* se pueden encontrar tres especies, las *P. aeruginosas,* las *P. putida* y *P. fluorecens.* Asimismo, cabe destacar que no son las bacterias hidrocarburolíticas autóctonas capaces de degradar los hidrocarburos, hay más como *Bacillus cereus* y *Bacillus* sp*.,* que llegan a eliminar el 58% del contaminante (Vázquez, 2019). Otros ejemplos de microorganismos degradadores de hidrocarburos son *Micrococcuss, Alcaligenes, Achromobacter, Nocardia, Vibrio, Brevibacterium, Corynebacterium, Candida, Rhodotorula, Sporobbolomyces, Acinetobacter* y Flavobacterium, que llegan a eliminar entre un 60% y 70% de los hidrocarburos (Arenas, 2018).

Los disolventes de limpieza son alcanos y alquenos clorados, es decir, tienen la misma estructura que los hidrocarburos anteriores, pero sustituyendo uno o varios de sus hidrógenos por cloro (Betancourth *et al*., 2004). A diferencia de otros hidrocarburos, estos se degradan lentamente en condiciones aerobias y, si presentan varios cloros en su estructura, esta degradación puede verse inhibida. Por ello, para su eliminación es clave la participación de microorganismos anaerobios.

El papel de las biopelículas en cuanto a los disolventes industriales, no solo se limita a la degradación de los mismos, sino que también se utilizan capas superpuestas de estos consorcios microbianos para crear barreras impermeables y evitar que se extienda la contaminación (Betancourth *et al*., 2004).

3.2.1.4. Compuestos orgánicos

Los compuestos orgánicos presentes en recursos hídricos, como sólidos en suspensión, se pueden tratar con biofiltros. Para ello se hace pasar el agua contaminada a través de un filtro gracias a un sistema de succión. Este consta de un tanque con un medio filtrante en el cual se forman las biopelículas ya que cubren este material (Forero, 2007), es decir, se establece un consorcio microbiano en un soporte y se hace pasar el agua a través de él.

El agua se hace pasar a través de este medio filtrante obteniendo como efluente un recurso con menor contaminación orgánica, ya que esta queda adherida a él, donde es consumida por bacterias aeróbicas. Tras ello, se procedería a la sedimentación de la materia orgánica restante. El agua obtenida puede volver a filtrarse para un mejor resultado. La materia obtenida por sedimentación también se trataría con bacterias anaerobias y se deshidrataría, dando lugar a un residuo sólido. Con este sistema se puede llegar a eliminar hasta el 85% de la materia orgánica (Forero, 2007).

Un ejemplo de uso de biofiltro en el medio acuático es el utilizado para eliminar el amoniaco y la materia orgánica producida en piscifactorías. Este sistema presenta ventajas frente a otros, ya que es económico, requiere de poca energía y no genera subproductos tóxicos (Betancourth *et al*., 2004).

3.2.2. Factores a tener en cuenta

La biorremediación es un proceso complejo que depende de diversos factores que inciden en la biodegradabilidad. Los principales factores son el potencial genético, la biodisponibilidad, la estructura del contaminante, la toxicidad del contaminante y los factores ambientales (Vázquez, 2019).

El potencial genético hace referencia a la posible presencia en los microorganismos de los genes necesarios para ser capaces de metabolizar un contaminante. Debido a esta cuestión hay microorganismos más adecuados que otros para cada contaminante y, por el mismo motivo, a veces es necesario la actuación de diversas especies a lo largo de la mineralización de un contaminante, ya que cada microorganismo puede metabolizar un determinado sustrato (Sánchez y Rodríguez, 2003).

En el caso de que los microorganismos preexistentes en el mismo fueran adecuados para metabolizar el contaminante se produciría una atenuación del mismo, pero esto no ocurre siempre así, por lo cual a veces hay que proceder a realizar un proceso de bioaumentación, que consiste en deberían añadir otras cepas de microorganismos al medio. Hay que tener cuidado porque este proceso también puede implicar la liberación al medio de organismos modificados genéticamente y su persistencia puede ser un problema, ya que alteraría el medio natural (Sánchez y Rodríguez, 2003).

Para poder degradar hasta la mineralización los residuos, en muchos casos es necesario que se den interacciones entre diferentes microorganismos ya que el producto que genera una especie puede no estar degradado del todo y a la vez ser el substrato metabólico que necesita otra especie. Estas pueden ser relaciones de cometabolismo y/o sintrofismo. Este último consta de una necesaria acción conjunta de diversos microorganismos para poder degradar una sustancia (Sánchez y Rodríguez, 2003).

La biodisponibilidad hace referencia a la captación del contaminante por parte del microorganismo. Para ello hay que tener en cuenta el estado físico en el que está el contaminante, la concentración a la que se encuentra y su solubilidad en agua (Calvo, 2017). Además, para poder llevar a cabo la degradación de los residuos hay que tener en cuenta la velocidad a la que se pueden movilizar los contaminantes y la velocidad a la que pueden crecer los microorganismos en esas direcciones (Sánchez y Rodríguez, 2003).

La insolubilidad del residuo limita en gran medida la capacidad de degradación de los microorganismos, ya que, si no son solubles podrían quedar adheridos al medio sin ser degradado. Para evitar esta situación los microorganismos pueden producir biosurfactantes que disminuyen la tensión superficial del agua y bioemulsionantes que estabilizan las emulsiones entre el agua y otro líquido (Sánchez y Rodríguez, 2003). Para solventar la insolubilidad de algunos compuestos algunos microorganismos son capaces de producir biosurfactantes, como se ha mencionado anteriormente, en el caso de las *Pseudomonas* (Calvo, 2017).

No menos importante es la biodegradabilidad del residuo, es decir, la resistencia que oponen a la hora de ser degradados. La estructura del contaminante y las sustituciones químicas pueden hacer el compuesto más resistente y en ocasiones tóxico. Ejemplo de ello son los hidrocarburos que dependiendo de su estructura son más o menos fáciles de degradar (Calvo, 2017, Arenas, 2018). En cambio, la presencia de sustancias tóxicas, como en los hidrocarburos clorados, puede inhibir la degradación del residuo (Sánchez y Rodríguez, 2003).

En cuanto a los factores ambientales que pueden fluctuar rápidamente si la biorremediación se realiza in situ en un medio natural o pueden modificarse a voluntad más fácilmente si se realiza en un medio controlado como son los biorreactores. Son factores ambientales la temperatura, pH, salinidad, oxígeno y nutrientes, entre ellos nitrógeno, fosforo y hierro (Arenas, 2018).

La temperatura es un factor que influye de manera significativa a la biorremediación, ejemplo de ello lo menciona Ávila y sus compañeros en 2010, donde se realiza un estudio que demuestra que la eliminación de materia orgánica en el tratamiento anaerobio de aguas residuales puede disminuir del 90% al 20% al pasar de 37ºC a 20ºC.

Que el medio presente un pH adecuado es muy importante para poder realizar diferentes procesos celulares por ejemplo la síntesis de proteínas. Según Trujillo en 2017, si se realiza un cambio lento y gradual del pH, por ejemplo, al acidificar el medio, en ocasiones es posible una adaptación celular y la supervivencia del microorganismo a un pH que o podría soportar en caso de haberse modificado bruscamente.

Por otro lado, la disponibilidad de nutrientes (y en algunos casos de oxígeno) es clave para el desarrollo de los microorganismos. También es importante tener en cuenta la presencia de aceptores de electrones como el oxígeno, nitratos o sulfatos. Esta cuestión se puede solventar una vez más con bioestimulación y *bioventing* (Sánchez y Rodríguez, 2003). En el medio acuático, un ejemplo de un caso concreto y común de nutrientes limitantes es la falta de hierro. Esta carencia se podría solucionar incorporando sideróforos bacterianos a la comunidad ya que pueden establecer una relación simbiótica con otros microorganismos aportando lo que necesitan (Croft *et al*. 2005).

3.3. Discusión de los resultados

Desde el punto de vista científico las biopelículas son un recurso muy interesante debido a las grandes ventajas que presentan frente a los microorganismos en suspensión, como son su resistencia ambiental y su distinguida capacidad metabólica al componerse de distintas especies (Betancourth *et al*., 2004). Es por ello que cada vez se estudian más para obtener beneficios a través de ellas en diferentes ámbitos, siendo uno de ellos la

biorremediación (Brutti *et al*., 2018). Por todo ello, este trabajo de fin de grado consta de una recopilación bibliográfica que aúna estos dos temas de actualidad.

El recurso hídrico es uno de los más importantes del planeta, ya que es limitado y toda vida depende de él. Como otros muchos recursos, el agua está siendo contaminada por la actividad antrópica (ONU, 2010). Dentro de la contaminación del agua destacan los principales contaminantes que son las aguas residuales domésticas e industriales, lixiviados agrícolas, metales pesados, hidrocarburos, y compuestos orgánicos (Cota *et al*., 2018).

Para realizar la biorremediación se pueden distinguir dos tipos de tratamiento para estos contaminantes, *in situ* o *ex situ*. Los tratamientos *ex situ* pueden realizarse principalmente por dos métodos, biorreactores y biofiltros. Los biorreactores son grandes tanques donde el agua contaminada está en contacto con las biopelículas. Pueden ser de lecho móvil y de lecho fijo (Quintero, 2021). La idea fundamental es que se puede mejorar la interacción entre el fluido y los microorganismos con estructuras para favorecer el crecimiento microbiano. Por otro lado, los biofiltros constan de un material filtrante donde hay formada una biopelícula y a través del cual se hace pasar el agua contaminada (Forero, 2007).

En cambio, el tratamiento *in situ* consiste en condicionar el medio natural para que se de la biorremediación. Esto se puede realizar con bioaumentación, bioestimulación y *bioventing* (God, 2020).

En ambos tipos de tratamiento es importante considerar que la biorremediación es un proceso complejo en el que se ven involucrados factores propios de los contaminantes, de los microorganismos y del medio. Es decir, para que se dé la eliminación máxima posible de los contaminantes deben de estar en contacto con el mismo los microorganismos adecuados y en las condiciones que estos requieran (Vázquez, 2019).

Realizando la búsqueda bibliográfica se puede encontrar gran cantidad de información sobre las biopelículas y su formación, ocurriendo lo mismo para la biorremediación. Generalmente los conceptos se explican de manera similar en todos los artículos sin encontrar contradicciones entre ellos.

Para los contaminantes es cierto que en general también hay gran información sobre la remediación de cada tipo, la mayor problemática encontrada es que al buscar ejemplos concretos son ensayos aislados que no siempre se pueden comparar entre ellos ya que no tienen la misma metodología, ubicación, recursos u objetivo entre otras características.

Una limitación considerable en esta búsqueda bibliográfica es la extensión de la misma, ya que al no poder excederse de un número de páginas concreto no se puede mencionar muchos ejemplos de cada tipo de contaminante para compararlos. Otra limitación al tratarse de un estudio bibliográfico es la dependencia de otros autores y de sus publicaciones para poder construir los resultados.

4. Conclusiones

Con esta revisión bibliográfica se ha aportado a la comunidad científica una visión global sobre la aplicación de la biorremediación, mediante la utilización de microorganismos, a la eliminación de contaminantes del recurso hídrico, revisando casos concretos y métodos para su mejora, destacando las siguientes ideas principales:

La biorremediación presenta ciertas ventajas frente a otros medios de remediación como los químicos o físicos. Una de ellas es la poca contaminación que transfiere entre los medios sólido, líquido y gaseoso.

Desde el punto de vista de los tipos de tratamiento, si se realiza *in situ* se trataría de un proceso poco intrusivo en el medio, aunque hay que tener en cuenta que a veces hay que modificarlo para obtener las condiciones ideales para el desarrollo de los microorganismos. Son económicos y aceptados al eliminarse los contaminantes de manera natural.

En cuanto a los tratamientos *ex situ*, es cierto que necesitan más infraestructuras y el transporte del fluido, pero a su vez siguen siendo más económicos que otras alternativas físicas o químicas. Además de ello, a través de los biorreactores se obtiene una mayor eficacia en la metabolización de los compuestos con respecto al medio natural, ya que la concentración de microorganismos es mucho mayor y las condiciones ambientales en las que se

encuentran son mucho más fáciles de controlar. Por otro lado, los biofiltros destacan por ser un método sencillo, económico y con un bajo requerimiento energético.

El principal inconveniente de la biorremediacón con microorganismos es la generación de compuestos tóxicos o dañinos resultantes de la metabolización del residuo inicial que, si no se tienen en cuenta, en ocasiones pueden empeorar la situación dando lugar a compuestos más tóxicos aún. Por ello, hay que dedicar esfuerzo y recursos a estudiar las diferentes rutas metabólicas disponibles para la eliminación de los contaminantes.

Revisando la adecuación de los microorganismos a casos concretos de contaminantes, se puede deducir que las cianobacteras, junto a las microalgas, se recomiendan para la eliminación de fósforo, nitrógeno y materia orgánica, sobre todo en presencia de luz y oxígeno. Por otro lado, en los medios más tóxicos, como aquellos en los que hay gran concentración de metales pesados o hidrocarburos, destacan especies más resistentes como es el caso de *Pseudomonas.*

La investigación es necesaria para poder mejorar este tipo de procesos, ya que actualmente se ven limitados por la falta de conocimientos en metabolismo microbiano y su relación con diferentes contaminantes. Es indispensable conocer como los microorganismos reaccionan ante los nuevos contaminantes creados por el hombre y, por otro lado, el estudio de la modificación genética de cepas para mejorar la adaptación y obtener una mayor eficiencia.

5. Referencias bibliográficas

Aloni A. y Brenner A. (2017). *Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation.* Journal Water, vol. 9, no. 714, pp. 1-11.

Aparicio A. (2013). *Historia económica mundial siglos XVII-XIX: revoluciones burguesas y procesos de industrialización.* Economía Informa, vol.378, pp. 60-73.

Arenas D. (2018). *Proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de Pseudomonas*. Monografía para optar el título de Fundación Universidad de América, Facultad de Educación Permanente y Avanzada.

Ávila S., González J.L., Canche J.A.., Calva G., Avila J.C., Oropeza N.A. y Carrión J.M. (2010). *Uso de un filtro anaeróbico sumergido en la remoción de materia orgánica de aguas residuales municipales. Resultados preliminares.* Revista CENIC. Ciencias Biológicas, vol. 41, pp. 1-9.

Banco mundial (2022). *Población total.* Disponible en: https://datos.bancomundial.org/indicator/SP.POP.TOTL [Última consulta el 29/06/2022]

Betancourth M, Botero, J.E. y Rivera S.P. (2004). *Biopelículas: una comunidad microscópica en desarrollo.* Colombia Médica, vol. 35, no. 3, pp. 34-39.

Brutti L., Beltrán M. y García I. (2018). *Biorremediación de los recursos naturales.* INTA Ministerio de Agroindustria de Buenos Aires.

Burgos M.E. (2018). *Los Desafíos Del Futuro: Crecimiento Poblacional Y Desarrollo.* Revista de Ciencias Sociales, vol. 6, no. 11, pp. 179-185.

Calvo A.F. (2017). *Biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos mediante sistemas bio-absorbentes.* Tesis Doctoral, Universidad de Granada.

Candela R. D. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bucaramanga.

Centro de Investigaciones Históricas de América Central (CIHAC) (2021) *Historia de la microbiología en contexto global.* Universidad de Costa Rica, ed. 1.

Ceron C.A. (2021). *Eliminación de especies de cromo en soluciones acuosas por un sistema a base de biopelículas soportadas en material zeolítico.* Tesis doctoral, Universidad Autónoma del Estado de México.

Cervantes C., Espino A.E., Acevedo F., León I.L., Rivera M.E., Ávila M., Wróbel-Kaczmarczyk K., Wróbel-Zasada K., Gutiérrez C., Rodríguez J.S. y Moreno R. (2006). *Interacciones microbianas con metales pesados.* Revista latinoamericana de microbiología, vol. 48, no. 2, pp. 203-210.

Corso H.L. (2022). *Bioenergía y biorremediación.* Desde la Patagonia difundiendo saberes, vol. 19, no. 33, pp. 36-55.

Cota K,. Nuñez J.A., Delgado M. y Martinez A. (2018). *Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones*. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, vol. 21, no. 1, pp. 37-44.

Croft M., Lawrence A. y Raux-Deery. (2005). *Algae acquire vitamin B12 through a symbiotic relationship with bacteria.* Nature, vol. 438, pp. 90–93.

Di Paola M. y Vicien C. (2010). *Biorremediación, vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación.* Proyecto “Potencialidades de la biotecnología para el desarrollo industrial en Argentina” CEUR-CONICET.

Fernández M., Florez D., Yactayo M., Lovera D., Quispe L., Landauro C. y Pardave W. (2020). *Remoción de metales pesados desde efluentes mineros, mediante cáscaras de frutas.* Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 8, no 1, pp. 21-28.

Fernández J., Martín M. y Mosquera F. (2014). *Uso de microalgas inmovilizadas en biofilm para tratamiento de aguas residuales.* CONAMA.

Forero, R. (2007). *Aproximación a la problemática del manejo y tratamiento de las aguas residuales del corregimiento de Arauca (Palestina).* Universidad Nacional de Colombia.

García A.M., Villora J.M., Moreno D.A., Ranninger C, Callejas P. y Barba M.F. (2004). *Aplicación de un material vitrocerámico a la biorremediación de*

metales pesados. Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio., vol 43, no 1, pp. 59-62.

God J. (2020). *Aplicación de microalgas para la remoción de nutrientes en efluentes agrícolas: Revisión de literatura.* Trabajo de Fin de Grado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

González S., González O. y Maldonado L.E. (2002). *Tratamiento de aguas residuales utilizando biopelículas sobre un material poroso.* Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.

Granada C. A. y Prada Y. (2015). *Caracterización del lixiviado agroecológico a partir de residuos orgánicos de cultivo.* Revista de Investigación Agraria y Ambiental, vol. 6, no. 2, pp. 169-182.

Guanin L.C. y Reatiqui D.N. (2022). *Eutrofización de aguas residuales domiciliarias con absorción biológica de nitrógeno y fósforo.* Universidad Técnica de Cotopaxi.

Harrison J., Turner R., Marques L. y Ceri H. (2006*). Biopelículas. Los avances en el conocimiento de estas comunidades microbianas están desencadenando una revolución que puede transformar la microbiología.* Investigación y ciencia, vol. Marzo, pp. 76-83.

Ivar do Sul J. y Costa M. (2014). *The present and future of microplastic pollution in the marine environment.* Environmental Pollution, vol. 185, pp. 352-364.

Kitchenham (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews.* Keele University.

León A.L. (2021). *Evaluación y selección de fitoplancton del Lago de Atitlán para su potencial uso en biofilms para el tratamiento de aguas residuales.* Universidad del valle de Guatemala.

Loera A., Ramírez F., Avelar F. J y Guerrero A.L. (2012*). Biopelículas multi-especie: asociarse para sobrevivir.* Investigación y ciencia, no. 54, pp. 49-56.

Mora A. y Bravo E. (2017) *Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales.* Acta Biológica Colombiana, vol. 22, no 1, pp :77-84.

Olarte S. y Cristiano J. (2021). *Aplicación de microorganismos asociados a biopelículas.* Logos Ciencia & Tecnología, vol. 4, no. 1, pp. 153-163.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2010). *El agua en un mundo en constante cambio, El 3er Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.*

Pérez M.C., Gázquez J.J., Molero M.M., Barragán A.B., Martos A., Simón M.M. y Sisto M. (2018). *Avances de Investigación en Salud a lo largo del Ciclo Vital*, vol 2. Editorial ASUNIVEP.

PNUMA (2011). *Seguimiento a nuestro medio ambiente en transformación: de Río a Río+20 (1992-2012).*

Quintero G.V. (2021) *Análisis de biopelículas aplicado a la remoción de carga de contaminantes en plantas de tratamiento de aguas residuales no domésticas en empresas de bebidas no alcohólicas*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad cooperativa de Colombia.

RAE. (2021). *Definición de contaminante.* Diccionario de la lengua española.Disponible en: https://dle.rae.es/contaminante [Última consulta el 29/06/2022]

Rajbir S., Debarati P. and Rakesh J. (2006). *Biofilms: implications in bioremediation.* Trends in Microbiology, vol.14, no. 9, pp. 389-397.

Reyes Y., Vergara I., Torres O., Díaz M. y González E. (2016). *Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria.* Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, vol. 16, no. 2, pp. 66-77.

Rivas A.B. (2019). *Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas.* Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Rodríguez A.C. (2015). *Expresión de genes en biopelículas crecidas sobre petróleo crudo de tres cepas de Pseudomonas aeruginosa.* Trabajo de Fin de Máster, Universidad de los Andes.

Rojas R. (2002). *Conferencia sistemas de tratamiento de aguas residuales.* Curso internacional de gestión integral del tratamiento de aguas residuales, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud.

Rosales A., Rodríguez C. y Ballen-Segura M. (2018). *Remoción de contaminantes y crecimiento del alga Scenedesmus sp. en aguas residuales de curtiembres, comparación entre células libres e inmovilizadas.* Ingeniería y Ciencia, vol. 14, no. 28, pp. 11-34.

Sánchez J. y Rodríguez J.L. (2003) *Biorremediación: Fundamentos y aspectos microbiológicos.* Ind. Minería, no. 351, pp. 12-16.

Tripathi B.N. y Kumar D. (2017). *Prospects and Challenges in Algal Biotechnology.* Editorial Springer.

Trujillo M. (2017). *Biofilms microbianos.* Trabajo de Fin de Grado, Universidad de la Laguna.

Vázquez K.M. (2019). *Remoción de hidrocarburos totales mediante bacterias aisladas de la laguna Tampamachoco en Tuxpan, Veracruz.* Tesis profesional, Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache.

Yagnentkovsky N. (2011). *Aplicación de técnicas de biorremediación para el tratamiento de residuos industriales con alto contenido de metales pesados*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata.