BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Sistema híbrido de eliminación de azul de metileno en agua mediante fotocatálisis con catalizador SiO_2- Erionita seguido de biodegradación bacteriana”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA**:**

VIVIANA MENDOZA VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. GABRIELA PÉREZ OSORIO

CODIRECTOR O ASESOR:

DR. JOSÉ CARLOS MENDOZA HERNÁNDEZ

NOVIEMBRE, 2021 **PUEBLA, PUE.**

Dedicatoria

Este trabajo es en agradecimiento a mi padres, Judith Vázquez y Cesáreo Mendoza, quienes confiaron en mí en cada decisión que he tomado siendo mi guía durante todos estos años de vida.

A mis hermanos, Sandy, Idalia y Diego, por brindarme su apoyo desde mis primeros años de vida y quienes han estado durante este camino llamado "vida" en la que hemos vivido excelentes momentos llenos de mucha alegría y amor. Así mismo, hemos estado en momentos muy difíciles y complejos, sin embargo, la tenacidad y fortaleza han sido nuestros grandes aliados para seguir adelante y obtener lo mejor de cada acontecimiento.

A mi tío Hugo Vázquez quien en los últimos años ha sido quien me ha brindado su apoyo a su medida y quien ha estado ahí para escucharme y orar por mí.

A mis amigos desde inicios del primer cuatrimestre, quienes han fungido un papel bastante importante en mi formación académica y a quienes voy a recordar siempre por cada tarea, proyecto, y todo aquello que contraía (desvelos, estancias en la biblioteca, reuniones express en casa, etc.) y por su puesto por cada fiesta después de termino de cuatrimestre.

A mi pareja Rodolfo Mora por brindarme todo su apoyo, energía, entusiasmo y confianza que me sirvieron para no rendirme y realizar esta tesis. Así mismo, le agradezco por estar presente en uno de los momentos más importantes de mi vida. Gracias por el amor y paciencia hacía mí.

A TODOS aquellos que han sido participe de mi estancia en Puebla por brindarme sus mejores consejos de vida que han sido vital como parte de mi crecimiento como persona adulto y ser humano lo cual sigue siendo una experiencia muy compleja.

A cada uno de mis profesores de la Facultad de Ingeniería Química, quienes a través de sus clases impartidas me brindaron su conocimiento con base en su formación académica y experiencias en lo laboral y a también fuera de universidad.

Así mismo, a mi directora de tesis, la Dra. Gabriela Pérez, por brindarme la oportunidad de poder realizar esta tesis bajo su supervisión y que ha sido un paso de suma importancia, así también a mí codirector el Dr. José Carlos Mendoza por ser participe en el proceso de esta tesis.

Índice

INTRODUCCIÓN **8**

Objetivos **10**

Objetivo general 10

Objetivos específicos 11

Hipótesis **11**

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES **12**

1.1 Contaminación del agua 14

1.2 Contaminación por colorantes 16

1.2.1 Azul de metileno 23

1.3 Tratamiento de aguas residuales 25

1.3.1 Procesos de oxidación avanzada 28

1.3.2 Fotocatálisis heterogénea 32

1.4 Fotocatalizadores 35

1.4.1 Catalizador SiO_2 - Erionita 36

1.4.2 Método de síntesis 38

1.4.3. Método sol-gel 40

1.5 Microorganismos en el tratamiento aguas residuales 41

1.5.1 Bacterias 41

1.5.2 Biorremediación en colorantes textiles 43

1.5.3 Consorcios microbianos 44

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA **46**

2.1 Síntesis del catalizador 46

2.2 Caracterización del catalizador 46

2.2.1 Difracción de Rayos – X (DRX) 46

2.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) 47

2.2.3 Espectroscopia Dispersa de Energía (EDE) 47

2.3 Prueba de oscuridad 47

2.4 Pruebas de degradación fotocatalítica 47

2.5 Pruebas de degradación bacteriana 49

2.5.1 Propagación 50

2.5.2 Obtención del inóculo 50

2.5.3 Preparación de buffer de fosfatos 50

2.5.4 Preparación del mínimo mineral 50

2.5.5 Preparación de consorcios 51

2.5.6 Ensayos de degradación bacteriana 51

2.5.7 Evaluación de la degradación mediante espectrofotometría UV/Vis 52

2.5.8 Cinética de la reacción 53

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN **55**

3.1 Caracterización fisicoquímica 55

3.1.1 Estructura cristalina del catalizador SiO_2 - Erionita 55

3.1.2 Morfología de las partículas del catalizador SiO_2 - Erionita 56

3.1.3 Composición química elemental del catalizador SiO_2 - Erionita 57

3.2 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul de metileno 58

3.2.1 Curva de calibración 58

3.2.2 Prueba de oscuridad para azul de metileno con el catalizador SiO_2 - Erionita..... 58

3.2.3 Prueba de degradación para azul de metileno sin SiO_2 -Erionita 59

3.2.4 Prueba de degradación para Azul de Metileno con SiO_2 -Erionita..... 60

3.3 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos..... 62

CONCLUSIONES 68

BIBLIOGRAFÍA 70

Índice de tablas

Tabla 1. *Clasificación de los colorantes de acuerdo con su estructura química*……...18

Tabla 2. *Clasificación de los colorantes de acuerdo con su método de aplicación*……20

Tabla 3. *Propiedades relevantes de azul de metileno*……24

Tabla 4. *Tipos de tratamiento de aguas residuales*……26

Tabla 5. *Etapas de tratamiento de aguas residuales*……..……..27

Tabla 6. *Contaminantes acuosos mineralizados por fotocatálisis*……34

Tabla 7. *Métodos de síntesis "Top-down" y "Botton-up"* ……...39

Tabla 8. *Métodos de síntesis de nanomateriales*……39

Tabla 9. *Remoción de color de colorantes azo en aguas residuales textiles por bacterias*..42

Tabla 10. *Cepas utilizadas para la degradación bacteriana*……..49

Tabla 11. *Preparación de medio mínimo mineral*……51

Tabla 12. *Composición química elemental de SiO_2 -Erionita*……57

Tabla 13. *Porcentaje de degradación de la prueba de oscuridad*……59

Tabla 14. *Azul de metileno sin catalizador SiO_2 -Erionita*……60

Tabla 15. *Azul de metileno con SiO_2 -Erionita*……61

Tabla 16. *Porcentaje de degradación de la solución de azul de metileno sin tratamiento fotocatalítico*……63

Tabla 17. *Porcentaje de degradación del azul de metileno con consorcios microbianos después del proceso fotocatalítico*……..……64

Tabla 18. *Orden de reacción para cada consorcio*……65

Índice de figuras

Figura 1. *Estructura química de azul de metileno*……..23

Figura 2. *Clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada*……..……31

Figura 3. *Generación de especies en un proceso fotocatalítico heterogéneo*……33

Figura 4. *Colector solar para el proceso de fotocatálisis*……..……..48

Figura 5. *Ensayos de la degradación bacteriana*……52

Figura 6. *Patrón de difracción de rayos X del catalizador SiO_2 -Erionita*…….55

Figura 7. *Micrografía de del catalizador SiO_2 -Erionita amplificada a 1000x (A y B*) …….56

Figura 8. *Análisis de composición química elemental del catalizador SiO_2 -Erionita*……57

Figura 9. *Curva de calibración de azul de metileno*……58

Figura 10. *Espectro de UV-VIS de la prueba de oscuridad para el colorante azul de metileno* ……59

Figura 11. *Espectro de UV-VIS del colorante azul de metileno sin catalizador SiO_2 - Erionita* ……..60

Figura 12. *Espectro de UV-VIS del colorante azul de metileno con catalizador SiO_2 - Erionita*…….……61

Figura 13. *Biodegradación del blanco con consorcios microbianos después del proceso fotocatalítico*……...……..63

Figura 14. *Biodegradación del azul de metileno con SiO_2 -Erionita después del proceso fotocatalítico*……64

Figura 15. *Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C1……...….66*

Figura 16. *Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C2*……66

Figura 17. *Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C3*……..67

INTRODUCCIÓN

Durante en las últimas décadas, la presencia de contaminantes orgánicos en los efluentes municipales e industriales han sido un problema de creciente preocupación debido al impacto que genera para el medio ambiente y sociedad, principalmente. Moreno et al. (2012) afirmaron lo siguiente:

> La industrialización y el aumento poblacional ha conducido a una gran demanda de servicios que incluyen la utilización de un amplio número de productos químicos, cuyos residuos, transformaciones y/o subproductos se encuentran en concentraciones elevadas en los cuerpos de agua como resultado de los vertimientos industriales que pone en peligro la biodiversidad y en riesgo la salud humana. (p.11)

En la elaboración de productos textiles se implementan diversas materias primas, como algodón, lana, fibras sintéticas, o mezclas de ellas. De acuerdo con las materias primas y reactivos que se utilizan en el proceso de elaboración de estos productos y que varían según los métodos de producción, así mismo, el impacto ambiental de sus efluentes líquidos es distinto (Garcés Giraldo et al., 2005; Aguedach et al.,2005). Hablando de forma particular de la industria textil, después de un proceso típico de teñido, las sustancias químicas contaminantes permanecen por un tiempo prolongado, entre ellas se encuentran los colorantes que no se fijan a las fibras textiles.

Garzon (2018, como se citó en Lara González, 2017) menciona que “los colorantes sintéticos son compuestos químicos xenobióticos, los cuales no se encuentran de forma natural en la biosfera, es decir, han sido sintetizados por el hombre” (p.38). Este tipo de colorantes son muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Debido a la complejidad estructural que presentan las plantas de tratamiento convencionales tienen un bajo porcentaje de remoción de estos, razón por la cual son vertidos a cualquier efluente de agua sin ser tratados anteriormente (Garzon, 2018).

Garzon Jimenez (2009, como se citó en Garduño Urbina, 2019) afirmó que:

> Los colorantes azoicos se utilizan en grandes cantidades en las industrias textil y alimentaria, y su vertido en aguas residuales de dichas industrias, incluso en bajas concentraciones, produce una intensa coloración que tiene un fuerte impacto ambiental, no sólo por su contaminación visual sino también por su toxicidad. De ahí la relevancia de su tratamiento y eliminación de las aguas previas al vertido de las industrias, buscando su decoloración y si es posible, su completa mineralización. (p.7)

Con base a lo anterior mencionado, los colorantes azoicos son los responsables de propiciar impactos al ambiente y al ser humano, sin importar la cantidad de concentración presente en los efluentes, de ahí la importancia de la implementación de algún tratamiento para la remoción de colorantes antes de su vertimiento a cualquier efluente.

El azul de metileno es un colorante que se ha utilizado en la industria para la tinción de fibras como el algodón y la seda, durante los procesos de teñido y que de acuerdo a los procesos de lavado, este se deposita en las aguas residuales, sin embargo, la mayoria de las industrias textiles al no contar con un tratamiento previo, su descarga directa es una fuente de contaminación con alto impacto ambiental debido a que no cumple con alguna normatividad regulatoria lo que puede inducir perturbaciones no solo en la vida acuática, sino también repercute en la salud de las poblaciones que se encuentran al rededor. Se ha comprobado que pueden ser carcinogénicos, además de que sus productos de degradación pueden ser más peligrosos de acuerdo con la toxicidad de estos (Arica & Bayramoglu, 2007).

Existe una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos usados, con mayor o menor éxito, en la remoción de colorantes de los efluentes textiles. Las aguas residuales coloreadas producidas a partir de los proceso de teñido en la industria textil, presentan diferentes tipos de sustancias orgánicas que son recalcitrantes y no biodegradables. Este tipo de aguas residuales no solo son resistentes a la oxidación biológica, al igual que a los tratamientos químicos convencionales que presentan costos elevados, son no degradable y únicamente transfieren el contaminante de una fase acuosa a una sólida, lo que demanda forzosamente un tratamiento posterior (Sahel et al., 2010). Por este motivo, se ha visto obligado a buscar la manera de remover estos contaminantes ya que estas sustancias que

se encuentran presentes en el medio acuoso son consideradas como recalcitrantes. Con base a lo mencionado anteriormente, a este tipo de contaminantes se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlos, antes de que sean descargados a los cuerpos de agua.

Para casos como la remoción de contaminantes recalcitrantes, se han desarrollado e implementado procesos de tratamientos avanzados, para la transformación, degradación y/o inactivación de los agentes contaminantes recalcitrantes. Es el caso de los procesos de oxidación avanzada (POA) que sirven como pretratamiento de aguas residuales; y una vez logrado una degradación relevante, se transfiere el agua residual a un proceso de tratamiento biológico que mejora la biodegradabilidad de contaminantes recalcitrantes, que los sistemas convencionales de tratamiento de agua no logran degradar, al igual que minimiza el tiempo de residencia (Malato et al., 2009).

La fotocatálisis heterogénea es el proceso que se ha utilizado para el tratamiento de agua y se basa en reducir la energía de activación de una reacción fotoquímica a través del uso fotocatalizador en estado sólido (Durán-Álvarez et al., 2015) a través del uso de la energía solar como única fuente de energía para la activación del catalizador, por lo que el proceso de degradación se convierte en una técnica sostenible y económico (Chiva Vicent et al., 2017).

Dicho lo anterior, la combinación de procesos de tratamiento para la remoción de contaminantes recalcitrantes y la optimización de los tiempos de remoción en aguas residuales a través de un proceso de oxidación avanzada y un proceso de tratamiento biológico hace posible obtener mejores resultados en el tratamiento. En este trabajo se pondrá a prueba la degradación de azul de metileno a través de un sistema combinado de fotocatálisis heterogénea seguido de una biodegradación bacteriana.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la remoción del colorante azul de metileno en agua con un sistema híbrido que consiste en un proceso fotocatalítico utilizando un colector solar y un proceso de degradación bacteriana posterior.

Objetivos específicos

1. Sintetizar el catalizador SiO_2 – Erionita (75%-25%) por el método sol-gel.
2. Caracterizar el catalizador por Difracción de Rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia Dispersiva de Energía (EDE).
3. Desarrollar pruebas de fotocatálisis en un colector solar para la degradación del colorante azul de metileno en agua a 50 ppm con el catalizador propuesto, utilizando radiación solar.
4. Realizar pruebas de biodegradación con las bacterias *Pseudomona putida B44, Serratia K120, Pseudomona B03, Serratia Mc107* y *Mc156* haciendo consorcios entre sí.
5. Analizar cuantitativamente mediante la técnica de espectrofotometría UV/Vis, la degradación del colorante azul de metileno al término del proceso fotocatalítico y del proceso de degradación bacteriana.
6. Determinar la cinética de reacción.

Hipótesis

La aplicación de un proceso de fotocatálisis seguido de un proceso de degradación bacteriana aeróbica sobre una muestra de azul de metileno a 50 ppm logrará aumentar el porcentaje de degradación en comparación con la degradación obtenida en los procesos de manera independiente.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

En las últimas décadas para la remoción de color de los efluentes textiles, se han utilizado una variedad de procesos que se dividen en cuatro tipos de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, la cuales son: físicas, químicas, biológicas y combinadas.

De acuerdo con Barrios-Ziolo et al. (2015) el tratamiento físico de colorantes y pigmentos presentes en el medio acuoso, se han implementado sistemas de filtración y procesos de adsorción a partir del uso de materiales como carbón activado y residuos agroindustriales, sin embargo, algunos materiales son óptimos para ciertos colorantes. Por otra parte, los procesos químicos que se implementa en el tratamiento de efluentes con colorantes se enfocan en técnicas de oxidación química, por ejemplo; los procesos de ozonización, fenton, fotocatálisis con luz ultravioleta, oxidantes convencionales (peróxido de hidrogeno), procesos de coagulación / floculación y electrocoagulación, entre otras tecnologías.

Los tratamientos biológicos dirigidos para la remoción de colorantes y pigmentos se dividen en procesos biológicos aerobios y anaerobios (Barrios-Ziolo et al., 2015), dependiendo del tipo de bacteria que lo lleve a cabo. Estos tratamientos abarcan métodos de bioadsorción, biodegradación y enzimático. Existen conclusiones dónde se afirma que “las estructuras químicas de los colorantes resultan a menudo demasiado complejas para utilizar un tratamiento simple, por lo que generalmente se utilizan consorcios microbianos con la capacidad de degradar colorantes obteniendo altas eficiencias de depuración” (Cortazar-Martínez et al., 2012, p.194).

De acuerdo con Eren (2012) menciona que se pueden combinar diferentes tecnologías, como son las físicas, biológicas y químicas, con el objetivo de poder optimizar factores como la cinética de remoción de color, así mismo, parámetros como la DQO y el COT e inclusive los tiempos de operación. Los procesos combinados pueden reducir desde la generación de lodos.

En las últimas décadas ha habido un interés considerable en la utilización de procesos de oxidación avanzados (POA) para el tratamiento de los efluentes con diversas problemáticas, por ejemplo, la elevada carga orgánica o la presencia de compuestos tóxicos y no biodegradables, en los que se utiliza luz solar y se han aplicado con mucho éxito. Una

aplicación de los procesos heterogéneos de oxidación fotocatalítica es que se han utilizado ampliamente para la degradación de colorantes (Wu et al., 2008).

La utilización de la luz solar durante el proceso de degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales a partir de fotocatalizadores hace que sea un proceso económicamente viable, enfocándolos a gran escala, lo cual se ha demostrado mediante la aplicación a tratamiento de aguas residuales industriales y lixiviados, dando como resultado la biodegradabilidad de compuestos orgánicos refractarios (Hassan et al., 2016).

Estrategias como los procesos biológicos que se han seguido para decolorar aquellos colorantes sintéticos, se basan en el uso de microrganismos dando resultados efectivos, aunque estos colorantes cuentan con estructuras químicas variadas. La implementación de consorcios microbianos en la eliminación de sustancias complejas y mezclas de contaminantes ha resultado ser una alternativa innovadora; este tipo de cooperación simbiótica entre bacterias heterotróficas y microalgas fototróficas, han servido como base para la eliminación de materia orgánica en las unidades de tratamiento de aguas residuales y ha servido para la remoción de contaminantes ambientales como lo son los colorantes presentan ventajas sobre el uso de cultivos simples, debido a que las especies presentes en el consorcio actúan sobre la molécula del colorante en distintas posiciones o bien, degradan los productos metabólicos formados (Subashchandrabose et al., 2011 y Hamouda et al., 2016).

De acuerdo con Singh et al. (2014) menciona que “existe una la amplia diversidad de colorantes textiles se hallan los colorantes azoicos, que son compuestos químicos xenobióticos deficientes en electrones, poseen grupos aceptores de electrones que generan una deficiencia electrónica en la molécula, volviéndola resistente a la escisión y consecuente degradación” (p.160). En este sentido el colorante azul de metileno es uno de muchos colorantes que es utilizado en la industria, debido a su composición química, genera daños en la flora y fauna acuática que se encuentra en los efluentes donde son depositadas las aguas residuales sin tratamiento previo ya que su composición química dificulta remover estos contaminantes.

Hasta ahora, se dispone de poca literatura sobre el uso de nanopartículas de SiO_2 para la fotodegradación del colorante azul de metileno. Por tanto, el presente trabajo está dirigido

al uso de nanopartículas de SiO_2 como semiconductores para la fotodegradación del colorante azul de metileno, presente en el agua.

1.1 Contaminación del agua

El agua es la fuente natural y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida, su disponibilidad promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km^3, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5% (35 millones km^3) es agua dulce, de esta cantidad aproximadamente el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (Cirelli, 2012). Dicho esto, nos da un idea precisa de que el agua disponible para la población es mínima y además, no toda población puede hacer uso de ella principalmente porque no se encuentra cerca de donde habitan o bien, deben adquirirla con costos elevados.

El agua es cada vez más deteriorada debido al aumento del desarrollo e industrialización. Conocido como un "solvente universal", el agua es capaz de disolver más sustancias que cualquier otro líquido en la tierra siendo también un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos. La contaminación del agua viene dada a partir de la presencia de sustancias nocivas como productos químicos o microorganismos, que la calidad de los efluentes, por ejemplo; un arroyo, río, lago, océano, acuífero u otro cuerpo de agua, degradando la calidad del agua y volviéndola tóxica tanto para los seres humanos y el medio ambiente. Más del 80 por ciento de las aguas residuales del mundo regresan al medio ambiente sin ser tratadas o reutilizadas, según las Naciones Unidas; en algunos países menos desarrollados, la cifra supera el 95 por ciento. Esta es una visión global, pero los tipos de contaminación varían de acuerdo con el desarrollo del país (Bolong et al., 2009 y Denchak, 2018).

Dependiendo de su destino, es necesario probar la calidad del agua monitoreando diferentes parámetros fisicoquímicos. Las pruebas físicas incluyen la medición del pH y la turbidez y la evaluación del color y el olor. Las pruebas químicas incluyen la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), el oxígeno disuelto, la alcalinidad y la dureza. También se pueden determinar otras características para un control de calidad específico con el fin de proteger los ecosistemas y otra biota. Por ejemplo, el

agua debe analizarse para detectar trazas de iones metálicos, aniones y sustancias orgánicas como pesticidas, tensioactivos, colorantes, etc (Khan & Ali, 2018).

Al menos para México, la calidad del recurso hídrico se mide a través de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), a partir de indicadores de la calidad del agua que la CONAGUA considera. Estos indicadores son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales (CF) (CONAGUA, 2018, p.59). Los indicadores encargados de la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua a partir de las descargas de origen municipal y no municipal, es la DBO_5 y la DQO (CONAGUA, 2018). Precisamente la relación entre estos dos parámetros indica el grado de biodegradabilidad del agua residual en cuestión, lo cual resulta de vital interés cuando se desea diseñar un proceso de tratamiento. Los SST surgen en las aguas residuales y en la erosión del suelo, al incrementar sus niveles, afecta el cuerpo de agua haciendo que pierda su capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática (CONAGUA, 2018, p.60).

Los efluentes industriales tienen una naturaleza compleja de contaminantes e incluyen sustancias orgánicas e inorgánicas como residuos farmacéuticos, tintes y metales, que requieren tratamiento antes de su descarga en corrientes de aguas residuales. Para evaluar la calidad del agua, se debe conocer información cualitativa y cuantitativa sobre los contaminantes (Khan & Ali, 2018).

La concentración de DQO en las aguas residuales industriales depende directamente del proceso de fabricación pudiendo alcanzar varios miles de ppm y para su eliminación es mediante procesos fisicoquímicos y biológicos aerobios o anaerobios. La DBO_5 en las aguas residuales industriales su concentración es totalmente dependiente del proceso de fabricación pudiendo alcanzar varios miles de ppm. Su eliminación se realiza por procesos fisicoquímicos y biológicos aerobios o anaerobios (Ros Moreno, 2011).

De acuerdo con Valencia et al. (2007, p.36) menciona que “Los contaminantes orgánicos tóxicos incluyen un gran número de compuestos, muchos de los cuales no son biodegradables o se degradan lentamente, se magnifican biológicamente y son carcinogénicos en humanos”. Es importante mencionar que este tipo de sustancias pueden permanecer durante un tiempo prolongado en el agua durante un largo periodo de tiempo y se debe a que las formación de estas son de forma artificial y poseen estructuras

moleculares complejas y de cierta forma llegan a ser difícil para los microorganismos poder degradarlas (Sma, 2015).

1.2 Contaminación por colorantes

De acuerdo con Gürses et al (2016), menciona que un aditivo de color es una sustancia capaz de impartir su color a un sustrato determinado, como pintura, papel o algodón, en el que está presente. Los tintes y pigmentos son los colorantes más importantes que se utilizan para añadir un color o cambiar el color de algo. Broadbent (2001) comenta “un tinte debe ser soluble en el medio de aplicación, generalmente agua, en algunos puntos durante el proceso de coloración”. Por otro lado, los pigmentos son los colorantes compuestos por partículas que son insolubles en el medio de aplicación.

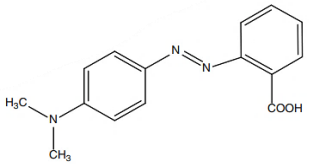
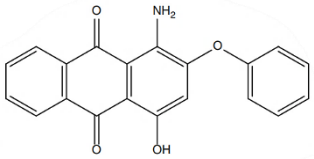
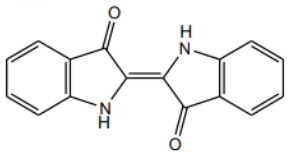
Los tintes (también llamados colorantes) tienen una aplicación considerable en varias industrias, incluidas la textil, el papel, el plástico, el caucho, el hormigón y la medicina, siendo la industria textil el principal consumidor de tintes. De acuerdo con Bazin et al. (2012) alrededor del 10% de los tintes utilizados en la industria se vierten al medio ambiente. El mayor problema que prevalece en la producción de tintes es el alto contenido orgánico y de color (Trifi et al., 2011). Esto se puede atribuir a las características químicas que tienen los tintes. La diseminación del tinte en los cuerpos de agua conduce al agua coloreada, que es una preocupación pública visible. Estas moléculas de colorante se encuentran dispersas en el medio acuoso e impiden que la luz solar llegue a la mayor parte del sistema de agua afectado y, por lo tanto, reducen el nivel de oxígeno disuelto (OD) en el agua. Los tintes también pueden aumentar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del cuerpo de agua contaminado (Ahmad et al., 2015).

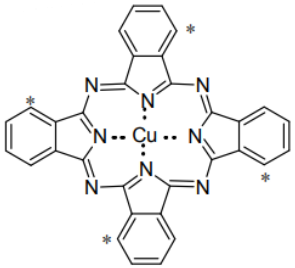
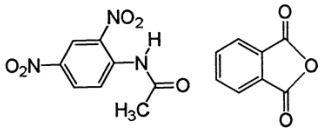
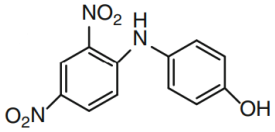
Para la elaboración de productos textiles se lleva a cabo por medio de una serie de operaciones unitarias donde se utilizan distintos tipos de materias primas como algodón, lana, fibras sintéticas y tintes o colorantes (Barrios-Ziolo et al., 2015), por lo tanto, al final de los procesos de operación se generan efluentes que contienen sales inorgánicas, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, surfactantes, colorantes y compuestos orgánicos de variada estructura (Mansilla et al., 2004).

Se estima que alrededor de $7x10^7$ toneladas de tintes sintéticos se producen anualmente para la industria textil en todo el mundo (Chandanshive et al., 2018, como se citó en Benkhaya et al., 2020). La clasificación de los colorantes se ha vuelto relevante puesto que

estos han ido en aumento con base al tipo y la cantidad de colorantes, los cuales, se pueden clasificar en función de su estructura, origen, color, solubilidad y métodos de aplicación. Al menos Colour Index (CI) tiene como método principal una clasificación de los colorantes sobre el uso o aplicación (Pepling et al. 1997). Tomando en cuenta la clasificación de los colorantes que Gürses et al (2016) realizó en su investigación basándose en CI, divide en dos grupos diferentes a los colorantes; estructuras químicas y los métodos de aplicación, como se muestra en las Tablas 1 y 2, respectivamente. Los grupos de clasificación básica se determinaron como colorantes azo, antraquinona, índigo, ftalocianina, azufre, nitro y nitroso considerando sus estructuras químicas. Y de acuerdo con el método de aplicación, se agruparon en colorantes reactivos, dispersos, ácidos, básicos, directos y Vat.

Tabla 1. *Clasificación de los colorantes de acuerdo con su estructura química*

Tipo de colorante	Estructura química	Características	Aplicación
Azoicos	 Rojo Ácido 2	Los tintes azo contienen un doble enlace nitrógeno-nitrógeno (N = N) y el grupo azo está unido a dos grupos y al menos uno es aromático. Los tintes azoicos, azufrados y dispersos son insolubles en agua. [a]	Estos colorantes se aplican a las fibras textiles tales como algodón, rayón, acetato de celulosa y poliéster. [b]
Antraquinónicos	 Rojo Disperso 60	La característica estructural común es la presencia de uno o más grupos cetónicos que presenta sustituyentes en conjugación con los grupos carbonilo. [c]	Los más notables desde el punto de vista industrial son los colorantes antraquinónicos VAT para la celulosa, el algodón, la viscosa y la lana. [c, d]
Indigoídes	 Indigo	Son colorantes de tipo VAT que presentan un sistema conjugado del tipo indólico [c]. También se conoce como Índigo, añil, Indigotina y azul de índigo.	El índigo se usa casi exclusivamente para teñir jeans y chaquetas de mezclilla. [e]

Derivados de ftalocianina	 Tetrabenzoporfirina (CI Pigment Blue 15:6, 74160)	Comprende una clase de cianinas, en ellas se cumple que un grupo metino (-CH=) se sustituye por un átomo de nitrógeno, formando una estructura de tetrabenzoporfirina. Son estructuras conocidas como [18]-Anulenos (hay 18 átomos periféricos).[c]	se han utilizado en muchas nuevas aplicaciones tales como cristales líquidos, dispositivos ópticos y electrónicos, sensores químicos, ópticas no lineales y conjuntos fibrosos además de tintas y pinturas de impresión [f].
Sulfurosos	 Amarillo Azufre 9	Los colorantes de azufre no poseen estructuras químicas bien definidas ni consistentes en composición. [g]	Los tintes de azufre se utilizan para teñir materiales celulósicos, así como también en el teñido de seda y papel en cantidades limitadas y uso en ciertos tipos de cueros. [h]
Nitro y nitroso	 Amarillo disperso	Estos colorantes tienen uno o más grupos nitro o nitroso conjugados con un grupo donador de electrones a través de un sistema aromático. Los compuestos hidroxinitrosos se forman por la acción del ácido nitroso sobre fenoles y naftoles. [i]	Estos se utilizan como intermediarios en la síntesis de otros colorantes como las azinas, por ejemplo, el Marrón Supramina GR. [c]

Nota. [a] (Growther y Meenakshi, 2008). [b] (Hassan &Carr, 2018). [c] (Marcano, 2018). [d] (Benkhaya et al., 2020). [e] (Ünlü 2008). [f] (Thimiopoulos et al. 2018). [g] (Chakraborty, 2010). [h, i] (Gürses et al., 2016).

Tabla 2. *Clasificación de los colorantes de acuerdo con su método de aplicación*

Tipo de colorante	Descripción	Aplicación
Reactivos	Las moléculas contienen uno o más grupos reactivos capaces de formar un enlace covalente con los grupos amina o sulfhidrilo de las proteínas en las fibras textiles. Tienen una alta solidez en húmedo, brillo y rango de tonalidades. [a, b]	Los tintes reactivos se utilizan para teñir fibras celulósicas, así como un pequeño porcentaje de seda y lana. [c, d]
Dispersos	Los colorantes dispersos son compuestos aromáticos no iónicos que contienen azo o antraquinona como grupo cromóforo. [e] aunque algunas de las propiedades de solidez en húmedo de los tintes en estos los sustratos son pobres. [f]	Principalmente se utilizan en poliéster, aunque también se han aplicado en nailon, acetato de celulosa y fibras acrílicas. [g]
Ácidos	Los colorantes ácidos son ácidos sulfónicos orgánicos; las formas disponibles comercialmente son habitualmente sales de sodio, que exhiben buena solubilidad en agua. [d]	Estos tintes, especialmente para tintes de ácido sulfónico, se utilizan ampliamente en los campos textil, farmacéutico, de impresión, cuero, tinte, papel y otros debido a sus colores brillantes y alta solubilidad. [h] Los tintes ácidos son más susceptibles de aplicarse a la lana, seda y al nailon en comparación con otros componentes. [i]
Básicos	Los tintes básicos conocidos como tintes catiónicos tienen carga positiva que generalmente resulta del catión amonio.	Estos tintes se aplican generalmente a sustratos acrílicos, de papel y de nailon. [d]

	Son solubles en agua y producen cationes coloreados en solución. [j] En la mayoría de las fibras, los tintes básicos tienen baja solidez del color. [d]	
Directos	Los tintes directos son tintes solubles en agua y se definen como colorantes aniónicos con sustantividad para fibras celulósicas que normalmente se aplican desde un baño de colorante acuoso que contiene un electrolito. Los tintes directos no requieren el uso de mordiente y, como su nombre lo indica, el procedimiento de teñido es bastante sencillo. [d]	Los tintes reactivos se utilizan para teñir fibras celulósicas, así como un pequeño porcentaje de seda y lana. [k]
Vat	Los tintes de tina “Vat” son conocidos por una mejor solidez del color, propiedades característicamente excelentes de solidez a la luz y a la humedad. Son principalmente solubles en agua caliente y algunos son solubles en presencia de poco Na_2CO_3. [k]	Los tintes Vat son aplicados a fibras celulósicas debido a su afinidad por esta última. [g]

Nota. [a] (Pereira y Alves 2011). [b] (Benkhaya & EL harf 2017). [c] (Mortazavi-Derazkola et al., 2017). [d] (Gürses et al., 2016). [e] (Carneiro et al., 2010). [f] (Hassan et al., 2009). [g] (Benkhaya et al., 2020). [h] (Wu et al., 2020). [i] (Salazar, 2013). [j] (Hunger 2003). [k] (Butler et al., 2016)

En los últimos años, la sociedad se ha dado cuenta de las consecuencias que se generan a partir del impacto que tiene en el ambiental la industria, una de ellas es la textil, puesto que a partir de todos los materiales que utiliza para la elaboración de productos que conllevan la utilización de colorantes, por lo tanto, ha surgido una mayor conciencia general sobre los posibles efectos adversos de los efluentes industriales contaminados con diversos contaminantes, incluidos los tintes, sobre el medio ambiente (Gürses et al., 2016).

Las consecuencias del carácter xenobiótico y recalcitrante de los colorantes acaban impactando en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Rawat et al., 2016, como se citó en Lellis et al., 2019). De acuerdo con Copaciu et al., 2013, los tintes metálicos complejados presentan un tiempo de vida media de 2 a 13 años. Al menos en su composición química presenta níquel, cobre, cobalto y, sobre todo, cromo (Christie, 2014), estos al ser liberados en el medio acuático, los cationes de metales pesados pueden ser asimilados por las branquias de los peces, debido a que presentan cargas negativas, permitiendo su acumulación en determinados tejidos (Vargas et al., 2009, como se citó en Gürses et al., 2016). De hecho, a través de la cadena alimentaria, pueden llegar a los órganos humanos provocando una serie de patologías (Khan & Malik, 2018). Además, el estrés oxidativo, proporcionado por el cromo de los tintes textiles, es otro problema asociado al carácter recalcitrante, ofreciendo un daño considerable al crecimiento y desarrollo de las plantas, especialmente a la fotosíntesis y asimilación de CO_2 (Copaciu et al., 2013).

En general, las enfermedades proporcionadas por los colorantes textiles comprenden desde dermatitis hasta trastornos del sistema nervioso central (Khan & Malik, 2018) o pueden estar relacionadas con la sustitución de cofactores enzimáticos que dan como resultado la inactivación de las propias actividades enzimáticas (Copaciu et al., 2013).

El tinte rojo disperso 1 también es utilizado por la industria textil y exhibe potencial mutagénico. A su vez, el tinte naranja disperso 1 exhibe un comportamiento mutagénico similar (Chequer et al., 2009, como se citó en Gürses et al., 2016) induciendo daño al ADN. El tinte rojo básico 9, utilizado en las industrias textil, del cuero, del papel y de las tintas (Duman et al., 2015, como se citó en Gürses et al., 2016), ofrece potencial carcinogénico en humanos y alta toxicidad ambiental (Foguel et al., 2015). Se descompone, en condiciones anaeróbicas, en aminas aromáticas cancerígenas y su eliminación en cuerpos

de agua tiene el potencial de causar dermatitis alérgica, irritación de la piel, mutaciones y el cáncer mismo (Sivarajasekar & Baskar, 2014). El cristal violeta, es otro colorante que es capaz de generar cistitis química, irritación de la piel y tracto digestivo, insuficiencia respiratoria y renal (Mani & Bharagava, 2016).

1.2.1 Azul de metileno

El azul de etileno es un colorante que cuenta con diversas aplicaciones, por ejemplo, es usado en la industria textil, cosmética, farmacéutica, alimenticia, de plásticos, papel, educativa, investigativa, entre otras (Benatti et al., 2006, como se citó en Albis Arrieta et al., 2017)

Uno de los colorantes que más se utiliza en la industria textil es el cloruro de metiltionina o azul de metileno o cloruro de 3,7-bis(dimetilamina)-fanazationio. Es un colorante catiónico básico orgánico que presenta resistencia a una diversidad de tratamientos convencionales (Ndolomingo & Meijboom, 2015, como se citó en Meléndez Zambrano & Navarro Ramírez, 2019, p.24). De acuerdo con Marcano (2018) indicó lo siguiente:

> El ejemplo típico de las tiazinas es el Azul de Metileno, que se emplea tanto como sal doble de cloruro de Zn o como cloruro simple, tiene múltiples aplicaciones entre ellas en medicina como inyectable para combatir la cianosis, como antiséptico tópico para mucosas, como indicador de óxido-reducción y para teñir preparaciones biológicas; no es muy estable y se descompone a temperaturas superiores a los 85°C. (p.73)

En la Figura 1, se puede observar la estructura de azul de metileno y algunas de sus propiedades se encuentran en la Tabla 3.

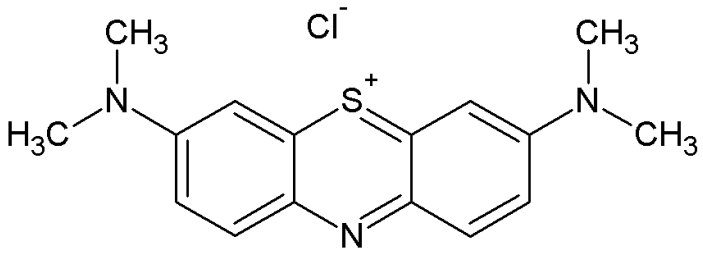


Figura 1. *Estructura química de azul de metileno (Fuente:* Shu Hui & Ahmad Zaini, 2015)

Tabla 3. *Propiedades relevantes de azul de metileno (Fuente: elaboración propia)*

	Azul de metileno
Nombre químico	3,7-bis(dimetilamino)- Cloruro de fanazationio
Nombre IUPAC	[7-(dimetilamino) fenotiazin-3-iliden]-dimetilazanio; cloruro; rehidrato
Numero de CAS	122965-43-9
Clasificación	Fenotiazinas
Formula molecular	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
Peso molecular	319.9 g/mol
Solubilidad	Soluble en agua, cloroformo y parcialmente soluble en alcohol
Color	Verde oscuro que produce una solución azul en agua
Forma física	Cristales o polvo
Otros nombres	Cloruro de trimetiltionina; Cloruro de metiltionina; Cloruro de trimetildiaminofenazatonio; CI Basic Blue 9, 52015;

Azul de metileno es un fotosensibilizador que en el rango de 585 – 670 nm de la luz UV excita la estructura de fenotiazina hacia un estado de radical libre o triplete formando moléculas de radicales superóxidos y que pueden llegar a ser perjudiciales puesto que pueden oxidar moléculas de ADN (Meléndez Zambrano & Navarro Ramírez, 2019). De acuerdo con Ávila (2011, como se citó en Meléndez Zambrano & Navarro Ramírez, 2019) hizo mención que:

> Este colorante no es considerado como altamente tóxico, sin embargo, puede causar efectos perjudiciales pues su exposición aguda puede producir aumento de la frecuencia cardiaca, vómitos, shock, formación de cuerpos de Heinz, cianosis, ictericia y tetraplejia y necrosis de los tejidos en humanos. (p.25)

La presencia de azul de metileno en las aguas residuales que no han sido tratadas y que posteriormente son vertidas a los efluentes, trae consigo diversas consecuencias, entre las más visibles se puede mencionar una alta coloración aún en mínimas concentraciones, así

como también la reducción de la actividad fotosintética debido a la baja penetración de luz solar, afectando a los seres vivos.

La eliminación del color de este tipo de efluentes es un problema ambiental importante debido a la dificultad de tratar tales corrientes mediante métodos de tratamiento físico, químico y biológico (Jian-xiao et al., 2011). Investigaciones anteriores han demostrado que no se recomienda la aplicación de tratamientos convencionales debido al tiempo de tratamiento y energía lo que conlleva el aumento de los costos para su degradación, así como también la generación de lodos después del tratamiento.

Con base a lo dicho anteriormente, se han sugerido varios adsorbentes alternativos para la adsorción de azul de metileno como carbón activado o minerales de arcilla, especialmente zeolitas naturales y modificadas (Canli et al., 2013)

1.3 Tratamiento de aguas residuales

Los procesos utilizados en la industria textil emplean diversas sustancias, así como también requieren de grandes cantidades de agua y generan cantidades considerables de aguas residuales contaminadas que en su mayoría no reciben algún tratamiento previo antes de ser liberadas a los cuerpos de agua, generando diversos problemas ambientales. Los residuos de tintes representan uno de los grupos de contaminantes más problemáticos porque pueden ser fácilmente identificados por el ojo humano y no son fácilmente biodegradables (Ong et al., 2011). A pesar de que existe una gran variedad de colorantes que se utilizan en la industria como parte fundamental de las materias primas para distintos procesos, los colorantes tipo azo (--N==N--, grupo funcional cromóforo), al menos en las aguas residuales municipales se encuentran en 70% de los colorantes encontrados en las aguas residuales municipales donde el grupo funcional –N==N— se puede sustituir con estructuras orgánicas e inorgánicas que le confieren propiedades químicas específicas a cada molécula (Saratale et al., 2011, como se citó en Barrios-Ziolo et al., 2015, p.119)

Con base a lo mencionado por el SEMARNAT (2018) las soluciones al problema de las aguas residuales era descargarlas directamente a los fluentes sin algún tratamiento previo donde ésta se diluía y por otra parte se enviaban a otro lugar dando por sentado de que el propio medio podía convertir los contaminantes sin alguna afectación al medio ambiente. Hoy en día se someten a tratamiento las aguas residuales con el objetivo de poder remover

la mayor cantidad de contaminantes antes de verterlas a cualquier efluente y así crear condiciones idóneas para que los organismos puedan absorber, diluir y procesarlos.

En términos generales, el tratamiento se refiere a un conjunto de procesos, tanto físicos, químicos y biológicos, que remueven o reducen los contaminantes. En la Tabla 4, se muestra una breve descripción de cada uno de ellos.

Tabla 4. *Tipos de tratamiento de aguas residuales (Fuente: Rodríguez de Jorge, 2020)*

Tipo de tratamiento	Descripción
Físicos	Dependen de propiedades físicas de los contaminantes, por ejemplo, la viscosidad, tamaño de partículas, flotabilidad, entre otros.
Químico	Se utilizan para la eliminación de oxígeno, fosfatos y nitratos, la coagulación, los procesos electroquímicos, la oxidación, intercambio de iones, etc.
Biológicos	Se utilizan procesos biológicos para la eliminación de partículas coloidales transformándolas en sólidos sedimentables.

Estos procesos se clasifican de forma general en tres etapas, sin embargo, existe una etapa preliminar. Estos niveles son de manera progresiva en los cuales se puede eliminar a partir de materia sólida, hasta microorganismos patógenos y olores desagradables característicos de las aguas residuales (SEMARNAT, 2018). En la Tabla 5, se menciona las etapas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5. *Etapas de tratamiento de aguas residuales*

Nivel de tratamiento	Descripción	Tipo de unidad
Preliminar	Remueve componentes (gran y mediano tamaño) causantes de problemas en el proceso, por ejemplo, ramas, piedras, animales muertos, plásticos, arenas, grasas y aceites. [a]	Rejas, tamices, desarenador, tanques de homogenización, trampas de grasa, entre otros. [b]
Primario	Se remueve una porción de sólidos y materia orgánica suspendida en el agua residual mediante la fuerza de gravedad. [a]	Sedimentador, unidades con inyección de aire, tanque séptico, Imhoff, entre otros. [b]
Secundario	Se remueve materia orgánica biodegradable soluble a partir de microorganismos que presentan bajo costo y alta eficacia de remoción. [a]	Lodos activados, biodiscos, filtros percoladores, humedales, lagunas, entre otros. [b]
Terciario	Remueve sólidos suspendidos a través de microfiltración. [a]	Microfiltración, coagulación y precipitación, adsorción por carbón activado, cloración, etc. [b]
Avanzado	Remueve material remanente suspendido o disuelto después de tratamiento biológico. [a]	Destilación, intercambio iónico, Electrodiálisis, etc. [c]

Nota. [a] (Noyola et al., 2013, pp.12-14). [b] (Hancco Mamani, 2019, p.40). [c] (Comisión Nacional del Agua, 2007)

La CONAGUA (2018, p.432) afirma que “los procesos de tratamiento más comunes incluyen los lodos activados, lagunas de estabilización, primario avanzado, lagunas aireadas, filtros biológicos, dual y otros”.

El tratamiento de aguas residuales de la industria textil no se ha implementado de la mejor forma posible puesto que se han aplicado procesos que presentan costos elevados, no cumplen con el objetivo de remoción de contaminantes y algunos generan subproductos que requieren un proceso más para poder tratarlos. Sabemos que existen procesos físicos, químicos y biológicos, que son aplicados para la remoción de contaminantes orgánicos presentes en los efluentes industriales y municipales. Cada método presenta técnicas o métodos distintos para su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas. Cortazar-Martínez et al. (2012) menciona que para remover con eficiencia los contaminantes presentes en las aguas residuales, es importante aplicar más de un proceso para la degradación del color e inclusive alcanzar la mineralización completa.

Al menos para México, representa un reto lograr el manejo sustentable del agua, ya sea de tipo municipal o industrial, puesto que los cuerpos de agua en su mayoria en el país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento previo. Esto ha limitado el uso directo del agua en otras actividades (Carlos, 2006).

1.3.1 Procesos de oxidación avanzada

Los contaminantes como productos químicos sintéticos, tintes, materias orgánicas, metales pesados, entre otros, son contaminantes que se descargan en los cuerpos de agua más cercanos con o sin tratamientos preliminares. Rodríguez Peña et al. (2020) afirmaron lo siguiente:

> La necesidad de tener nuevas opciones de tratamiento que permitan mejorar la calidad del agua residual ha llevado a la búsqueda de nuevos métodos más eficientes para la eliminación de compuestos químicos contaminantes, que presentan una alta toxicidad o baja biodegradabilidad. (p. 15).

Dentro de eso, los procesos de oxidación avanzados (POA “Advanced Oxidation Processes”) han marcado el camino en el tratamiento de aguas residuales. Se está convirtiendo rápidamente en la tecnología elegida para sus múltiples aplicaciones, como la destrucción de contaminantes orgánicos en forma de reducción de la toxicidad, la mejora de la biodegradabilidad, la eliminación de DBO / DQO, así como la eliminación de olores y colores (Mandal et al., 2010). Estos han marcado el camino en el tratamiento de aguas residuales y se ha convertido en la tecnología elegida para múltiples aplicaciones, como la destrucción de contaminantes orgánicos en forma de reducción de la toxicidad.

De acuerdo Andreozzi (1999, como se citó en Clemente, 2008) menciona que “los POA son procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, fundamentalmente el radical hidroxilo ($\bullet OH$), especie de gran poder oxidante debido a su elevado potencial redox (2.80 V), sólo superado por el flúor” (p.45). Sin embargo, en la gran mayoría de procesos de oxidación avanzada, gracias a las combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno, radiaciones UV y dióxido de titanio, o mediante el reactivo Fenton, se puede acelerar la generación de radicales hidroxilos (Bes Monge et al., 2018)

Los $\bullet OH$, se pueden generar a partir de medios fotoquímicos utilizando luz solar (ultravioleta, visible) lo que indica que el proceso es más barato a comparación del uso de una fuente artificial como la luz ultravioleta (lámparas de mercurio o xenón), llegando a oxidar la materia orgánica de manera efectiva (Silva A et al., 2009). La fotolisis ocurre, si la degradación sucede por excitación directa de la luz, mientras que, si usa sensibilizadores, éstos son compuestos inorgánicos (Fe_{3+}, TiO_2) u orgánicos (ácidos húmicos) que absorben la radiación ultravioleta y producen los radicales hidroxilos ($\bullet OH$), anión radical super-óxido($\bullet O_2$) (Chica Martínez, Galvis Caballero and Madrid Acevedo, 2007). Se han degradado contaminantes orgánicos con fotosensibilizadores produciendo mineralización, formándose una variedad de compuestos inorgánicos, tales como CO_2, H_2O, NO_{3^-}, haluros, fosfatos (Terán Solíz, 2016, p.23).

$$\text{Compuestos orgánicos} + \bullet OH \rightarrow H_2O + \text{iones inorgánicos} \quad (1)$$

Alguna técnicas avanzadas como la fotocatálisis heterogénea, utilizan reductores químicos para la transformación de contaminantes tóxicos, poco susceptibles a la oxidación, como los compuestos halogenados. De acuerdo con las tecnologías de oxidación avanzada, han mostrado eficiencia en el tratamiento de efluentes contaminados por sustancias recalcitrantes o tóxicas (Chiva Vicent et al., 2017).

La eficiencia de los $\bullet OH$, viene dada por el tipo de método de oxidación avanzada a elegir, así mismo, se consideran características tanto físicas como químicas del contaminante objetivo y las condiciones de operación. Además, se pueden generar a partir de la presión y la temperatura ambiente, siendo una alternativa atractiva para su uso en el tratamiento de agua residual, donde no se generan costos de operación altos en comparación a tratamientos de agua residual convencionales (Chiva Vicent et al., 2017).

Según Chiva Vicent et al. (2017) los POA se clasifican en procesos heterogéneos (energéticos y sin energía) y homogéneos, los cuales llegan a oxidar contaminantes hasta su posible mineralización y al menos, si se queda estado de oxidación intermedio puede acoplarse a otro método de tratamiento, como pueden ser procesos biológicos. La aplicación de los POA ha sido primordialmente enfocada en la segunda o tercer etapa del tren te tratamiento, tomando en cuenta si existe una etapa preliminar, por lo que aplican procesos biológicos con el objetivo de mejorar las características antes de verterlas a los cuerpos receptores. En la Figura 2, se muestra una clasificación de tecnologías de oxidación avanzada.

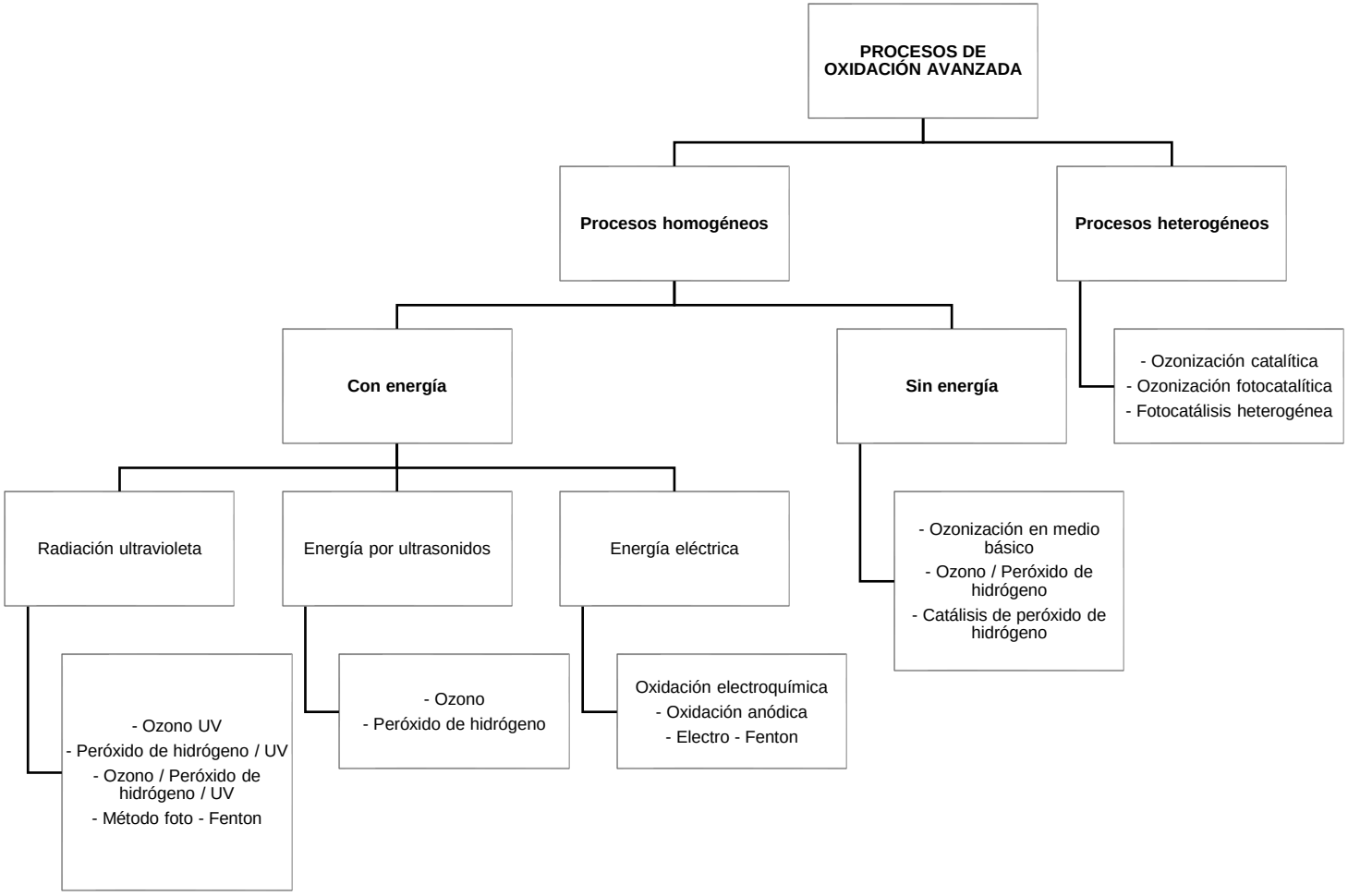


Figura 2. *Clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada (Sharma et al., 2011)*

1.3.2 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis se define como “cambio en la velocidad de una reacción o su iniciación por el efecto de la radiación solar u otro tipo de energía por la acción de un fotocatalizador, que absorbe los fotones y participa en la trasformación química de los reactantes” (Braslavsky, 2007).

La fotocatálisis heterogénea, se denomina de esta forma ya que consta el medio de reacción de dos fases: sólido (catalizador) y el líquido (reactivo) (Chiva Vicent et al., 2017). Este proceso utiliza la capacidad catalizadora con la que trabaja la luz UV (natural o artificial) con el objetivo de poder excitar a un material semiconductor, por ejemplo, los óxidos y que impulsa las reacciones de óxido-reducción mediante los pares electrón-hueco en su superficie (Peiró, 2003).

La actividad fotocatalítica como se muestra en la Figura 3, comienza a partir de un fotón hv apropiado (~385-400 nm) incide sobre un semiconductor. La energía de un fotón se absorbe por un e^- (electrón) de la BV (banda de valencia), lo que le permite ser promovido a la BC (banda de conducción) dejando un hueco h_{BV^+} en su BV. En un semiconductor la BV contiene un electrón con niveles estables de energía mientras que la BC que contiene mayor energía, Los e^- en la banda de conducción logran reducir el oxígeno (O_2) formando un radical superóxido ($0_2^{\bullet -}$) como se muestra en la reacción 2, y los huecos de la banda de valencia difunden hasta la superficie y reaccionando con el agua (H_2O) que es adsorbida formando radicales hidroxilos ($\bullet OH$), como se observa en la reacción 3 (Rodríguez Peña et al., 2020).

$$O_2 + e_{BV}^- \rightarrow 0_2^{\bullet -} \quad (2)$$

$$H_2O + h_{VB}^+ \rightarrow \bullet OH + H^+ \quad (3)$$

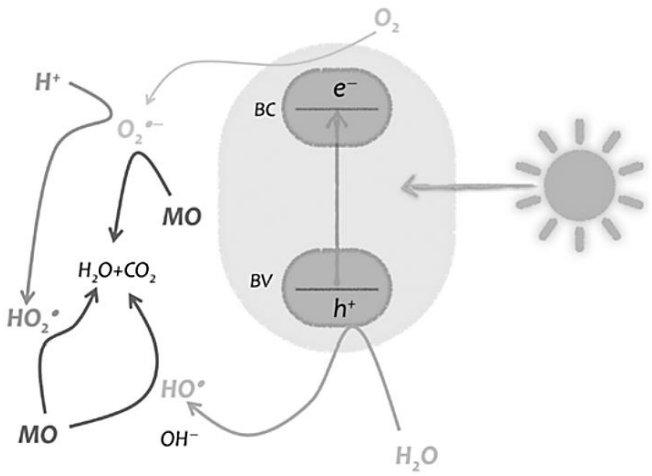


Figura 3. *Proceso fotocatalítico heterogéneo* (Rodríguez Peña et al., 2020)

Entre los procesos de oxidación avanzada, la fotocatálisis sido un proceso muy efectivo en el campo de remediación ambiental (Zanella, 2014). De acuerdo con Rodríguez Peña et al. (2020) el objetivo de la fotocatálisis heterogénea es que puede ser utilizada para procesos en los cuales se pretenda, por ejemplo, la eliminación de olores, sintetizar materias primas, potabilización, desinfección, biocompatibilización y mineralización; así como también del tipo de sustancia que se encuentra presente en el medio de reacción, por ejemplo, colorantes, herbicidas, bacterias, patógenos, compuestos aromáticos, usos médicos, entre otros.

Existe una diversidad de catalizadores que se emplean en el proceso de fotocatálisis. Estos catalizadores pueden ser sólidos, pueden trabajar en suspensión acuosa o gaseosa, bajo la radiación de luz ultravioleta (Carvajal Muñoz, 2011) como Al_2O_3, ZnO, Fe_2O_3 y TiO_2 dentro de los más comunes. Sin embargo, también se han propuesto catalizadores como SiO_2, AlO_2, etc.

La fotocatálisis heterogénea ha sido empleada desde hace más de dos décadas para el tratamiento de efluentes de variada carga orgánica, composición y biodegradabilidad provenientes de actividades industriales, domésticas, hospitalarias (Carvajal Muñoz, 2011), entre otros contaminantes que han empleado el TiO_2 son: benceno, tolueno, etilbenceno, fenoles, hidrocarburos halogenados, pesticidas y herbicidas, colorantes, entre otros (López, 2013). De acuerdo con Zanella (2014) afirma que “la principal ventaja de la fotocatálisis heterogénea, comparada con métodos convencionales, es que en muchos casos es posible obtener la mineralización completa de la sustancia tóxica, inclusive en ausencia de

reactivos adicionales" (p. 75). En la Tabla 6, se muestran algunos de los contaminantes mineralizados por fotocatálisis.

Tabla 6. *Contaminantes acuosos mineralizados por fotocatálisis (Fuente: Blake, 2001 como se citó en Herrmann, 2005)*

Compuesto orgánico	Ejemplo
Alcanos	Isobutano, pentano, heptano, ciclohexano, parafinas
Haloalcanos	Mono-, di-, tri- y tetraclorometano, tribromoetanao, 1,1,1-trifloro-2,2,2 tricloroetano
Alcoholes alifáticos	Metanol, etanol, propanol, glucosa
Ácidos carboxílicos alifáticos	Ácido fórmico, etanoico, propanoico, oxálico, butírico, málico
Alquenos	Propeno, ciclohexeno
Haloalquenos	1,2 -dicloroetileno, 1,1,2-tricloroetileno
Aromáticos	Benceno, naftaleno
Haloaromáticos	Clorobenceno, 1,2-diclorobenceno
Nitrohaloaromáticos	Dicloronitrobenceno
Compuestos fenólicos	Fenol, hidroquinona, catecol, metilcatecol, resorcinol, o-, m-, p-cresol, nitrofenol
Halofenoles	2-,3-,4- Clorofenol, pentaclorofenol, 4-fluorofenol
Amidas	Benzamida
Ácidos carboxílicos aromáticos	Ácido benzoico, 4-aminobenzoico, ftálico, salicílico, m- y p-hidrobenzoico, clorohidroxibenzoico, clorobenzoico
Agentes tensoactivos	Dodecilsulfato de sodio, polietilenglicol, dodecilbencensulfonato sódico, trimetilfosfato, fosfato de tetrabutilamonio
Herbicidas, plaguicidas	Atrazina, prometron, propetrina, bentazona 2-4D, monuron, etc.
Organofosforados	DDT, paratión, lindano, etc.
Colorantes	Azul de metileno, rodamina B, naranja de metilo, fluoresceína, rojo Congo

1.4 Fotocatalizadores

Los fotocatalizadores juegan un papel importante en el proceso de fotocatálisis, los cuales generan portadores de carga, es decir, electrones y huecos; y reacciones de óxido-reducción y se ha demostrado que los materiales que son apropiados son los semiconductores (Rodríguez Peña et al., 2020). De acuerdo con la literatura, se menciona lo siguiente:

> La estructura electrónica en materiales sólidos implica la existencia de bandas de energía originadas a partir de la localización de electrones en determinados orbitales de los átomos.
>
> Naturalmente, la energía en cada orbital es diferente y para una gran cantidad de átomos, los orbitales parecen estar superpuestos para formar regiones bien definidas con energía específica también conocida como banda de energía. En los materiales sólidos, la banda de conducción y la banda de valencia se reconocen como las bandas de energía más importantes, además existe una barrera energética entre ellas conocida como banda prohibida. (Rodríguez Peña et al., 2020, p.100)

Es decir, el objetivo del semiconductor es absorber la energía radiante y transformarla en especies altamente reactivas. Un fotocatalizador ideal debe exhibir las siguientes características:

1. Velocidad alta de reacción en la banda prohibida (*band gap*),
2. fotoestabilidad,
3. que no tenga actividad química ni biológica,
4. disponibilidad y bajo costo.

Zanella (2014) afirma que “seminconductores (como TiO2, ZnO, ZrO2, CdS, MoS2, Fe2O3, WO3, etc.), tanto puros como dopados, han sido examinados y usados como fotocatalizadores para la degradación de contaminantes en aire y agua” (p.76)

El TiO_2 ha sido uno de los semiconductores más utilizados y por tanto es producido en gran medida como un pigmento de bajo costo (Zanella, 2014). Sin embargo, la actividad fotocatalítica de los tres polimorfos del TiO_2: anatasa, rutilo y brookita (Rodríguez Peña et al., 2020), es afectada por diversos factores, por ejemplo, la estructura cristalina, el área

específica, la distribución de tamaños de partícula, y la densidad de grupos hidroxilos superficiales (Zanella, 2014).

Por otra parte, el depósito de nanopartículas metálicas en los semiconductores ha brindado excelentes beneficios a la eficiencia de reacciones fotocatalíticas llevadas a cabo en la degradación de compuestos orgánicos, ya que estas partículas ataren electrones, evitando la recombinación del par electrón-hueco y desplazando la absorción de la luz hacia longitudes de onda con menor energía (Hou & Cronin, 2012; Primo et al., 2011; Zhou et al., 2012, como se citó en Zanella, 2014).

1.4.1 Catalizador SiO_2 - Erionita

Los nanomateriales, contienen nanopartículas de aproximadamente de 100 nanómetros al menos en una dimensión. Existen diversos tipos de nanomateriales que cuenta con una amplia aplicación, presentan un enorme potencial como catalizadores o fotocatalizadores con una serie de reacciones de abatimiento de la contaminación atmosférica o del agua. Uno de estos catalizadores es el óxido de silicio que es de bajo costo y mucho más comercial que otros como el óxido de titanio que, aunque cuenta con buenas características semiconductoras presentan un alto costo para su adquisición.

La nueva era de la tecnología exige un método más económico y comercial para producir material excelente, especialmente dióxido de silicio. De acuerdo con la literatura, el SiO_2 se ha sintetizado y caracterizado mediante el proceso Sol - Gel para la degradación de azul de metileno, el cual concluye que a actividad fotocatalítica de la muestra calcinada con sílice se comportó mejor en la fotodegradación de la degradación del azul de metilieno que la de la muestra seca bajo una fuente de luz visible (Nandanwar et al., 2015). En un estudio realizado por Aly y Abd-Elhamid (2018) con base en la degradación fotocatalítica cinética sobre una solución acuosa de colorante azul de metileno soluble, que contenía nanopartículas de SiO_2 y bajo una fuente de luz ultravioleta, encontraron que el tinte fue completamente degradado en 90 s.

Las nano partículas (NP) de SiO_2 amorfas desempeñan un papel fundamental en un gran número de aplicaciones, ya que tienen características únicas, como un área de superficie más grande que la de otras partículas y materiales otorgando un soporte importante para las fases activas en la catálisis debido a su considerable porosidad y rigidez estructural, la alta eficiencia hacia las reacciones catalíticas implica la adsorción y degradación de elementos tóxicos y colorantes en medio acuoso. Los estudios han revelado la posible

contribución a la estabilización y prevención de las fases activas de sinterización, que se encuentran dispersas en su superficie (Cónsul *et al*., 2005).

Aunque las NP de SiO_2, son esencialmente inertes para muchas reacciones, muestra una actividad notable hacia la degradación fotocatalítica de los tintes en medio acuoso. Además, fotocatalizadores a base de sílice, como sílice-alúmina, zirconio con soporte de sílice, soporte de sílice-magnesia y sílice-alúmina-titania, exhiben actividad bajo UV irradiación a temperatura ambiente (Yuliati *et al.,* 2005).

Las zeolitas naturales se forman a partir de las ocurrencias termales o por las alteraciones volcánicas, a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros en donde influyen factores y condiciones para la formación de zeolitas, por ejemplo, la presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial. Existen cerca de 40 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo, tan solo algunas especies son ampliamente utilizadas como, por ejemplo: mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, eroinita y chabazita (Curi et al., 2006, p.112).

La erionita es una zeolita fibrosa natural que se encuentra en ciertas tobas volcánicas como contaminante ambiental. La estructura básica de los minerales de la serie eroinita es un tetraedro de aluminosilicato ((Si, Al) O_4) con átomos de oxígeno compartidos entre dos tetraedros. La erionita es un 'silicato de cadena' compuesto por seis tetraedros en cada borde de la unidad. Aunque la erionita tiene una estructura en forma de cadena, y cuentas con diferentes propiedades químicas y físicas. Tiene una densidad entre 2.02 y 2.08 y absorbe hasta un 20% de su peso en agua. Su absorción de gas, intercambio iónico y propiedades catalíticas son altamente selectivas y dependen del tamaño molecular o iónico de los compuestos absorbidos, así como del contenido catiónico de la propia erionita. No se sabe que la erionita se presente en otra forma que no sea fibrosa; sin embargo, la morfología detallada de los 'haces' de erionita que se componen de muchas 'fibras' y 'fibrillas' mejora drásticamente su relación superficie-volumen (Humans, 2012).

También se han utilizado zeolitas naturales en la aplicación para el tratamiento de aguas residuales, agua potable, entre otras aplicaciones. Al menos para el tratamiento de agua potable, utilizan como adsorbentes la zeolita con alto contenido de sílice (PACHECO VÁZQUEZ, 2018).

1.4.2 Método de síntesis

Los métodos se síntesis se denominan así por el conjunto de operaciones y procedimientos para obtener nanopartículas con cristalinidad y pureza elevada (Borja & Rojas, 2020).
Los métodos de síntesis de un material dependen de aquellas propiedades del material y de su aplicación. Para los materiales catalíticos se puede considerar:

1. “la composición química global y superficial, la microestructura local y la composición de fase para determinar directamente la actividad catalítica y selectividad y”,
2. “propiedades como la estabilidad térmica y mecánica, porosidad, la forma y las dimensiones de las partículas del catalizador, las cuales aseguran su implementación exitosa”.

“Para cubrir estos requerimientos, se han implementado diversos métodos de preparación, cada uno con múltiples variaciones dependiendo del material obtenido, esos métodos de síntesis se pueden resumir como: precipitación, coprecipitación, complejación, gelación, método cerámico, mezclado sólido-líquido (extrusión), impregnación, deposición homogénea, adsorción electrostática y síntesis hidrotérmica” (Palacio Santos, 2004, p. 54).

Existen diferentes tipos de métodos que se utilizan en centros de investigación, los más comunes que se pueden encontrar para la producción de nanomateriales los cuales se clasifican de dos formas: “top-down” refiriéndose a la reducción por desgaste y varios métodos de trituración en el sentido tradicional y “bottom-up” se refiere a la acumulación de un material desde abajo: átomo por átomo, molécula por molécula o grupo por grupo. En la Tabla 7, se mencionan los métodos de síntesis “Top-down” y “Botton – up”.

Tabla 7. *Métodos de síntesis "Top-down" y "Botton-up" (Fuente: Tulinski & Jurczyk, 2017)*

Top-down	Bottom-up
Aleación mecánica Molienda de bolas de alta energía Fresado reactivo Deformación plástica severa Litografía Métodos de micromecanizado Grabando	Haz de electrones (o iones) Autoensamblaje molecular Dispersión ultrasónica Sol – gel Condensación de gas inerte Deposición por arco de vacío Deposición de vapor químico / físico Epitaxia de haz molecular Deposición de vapor químico metal-orgánico Electrodeposición

Es importante señalar que los materiales producidos pueden tener propiedades significativamente diferentes, dependiendo de la ruta elegida para fabricarlos. Aparte de la manipulación directa de átomos, existen varios métodos ampliamente conocidos para producir nanomateriales: físicos, químicos y mecánicos como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. *Métodos de síntesis de nanomateriales (Fuente: Tulinski & Jurczyk, 2017)*

Físicos (bottom-up)	Químicos (bottom-up)	Mecánicos (top-down)
Deposición física de vapor Vaporización láser Pirolisis láser Técnicas de haz de iones Nanolitografía Síntesis de plasma Microondas	Deposición de vapor químico Crecimiento epitaxial Dispersión coloidal Sol – gel Vía hidrotermal Microemulsión Ruta del polímero	Aleación mecánica Molienda de bolas de alta energía Síntesis mecanoquímica Síntesis de activación mecanoquímica Deformación plástica severa

1.4.3. Método sol-gel

Una metodología que se utiliza para la síntesis de catalizadores es el método “sol-gel” en el que se obtiene polvos. Para la obtención de dichos polvos, se hace una preparación a partir de una suspensión de partículas “sol”, haciendo una agregación de estas partículas y eliminación del disolvente formándose un “gel”. Este proceso sol-gel tiene una amplia aplicación en el que se incluye aquellos procesos de síntesis de óxidos inorgánicos que se llevan a cabo a partir de reacciones en fase líquida para la formación de films, fibras y partículas no agregadas (Cerro Lloria, 2012). Es importante conocer que:

> La transición Sol-Gel se observa visualmente cuando la viscosidad aumenta considerablemente: el disolvente es atrapado en la red de partículas y dicha red polimérica impide que el líquido se separe, mientras el líquido previene que el sólido colapse en una masa compacta. La deshidratación parcial o total de un gel forma estructuras con poco volumen de poro, denominadas “xerogel”, que al aumentar la temperatura dan lugar a un material cerámico denso. La eliminación del disolvente, como pueden ser el secado supercrítico o la liofilización dan lugar a aerogeles, que se caracterizan por tener una elevada porosidad. (Cerro Lloria, 2012, p.9).

A partir de lo mencionado anteriormente, se debe a conocer cada una de las etapas de la formación del “sol -gel” para que la obtención de polvos se encuentre en condiciones idóneas para su posterior aplicación, como es el caso de la porosidad.

El método sol-gel involucra procesos a baja temperatura lo que lo hace atractivo. También la alta pureza y homogeneidad son atribuibles a su forma de preparación en sistemas multicomponente (de Jong, 2009). Comúnmente, se utilizan como precursores los alcóxidos, como el tetraetil ortosilicato, TEOS ($\mathrm{Si(OEt)_4}$) (De La Cruz Quiroga, 2020). También se han utilizado otros precursores metálicos que pueden sufrir las mismas reacciones de polimerización, dando lugar a un intermedio muy viscoso denominado gel. Una vez eliminadas todas las moléculas del disolvente de las partículas obtenidas, este gel da lugar un aerogel o a un xerogel dependiendo del proceso de secado, los cuales se obtienen mediante la calcinación. La principal ventaja de este método es el control que se puede ejercer sobre el tamaño y la morfología de las partículas mediante el precursor utilizado y controlando la hidrólisis de este mediante el pH (Tokumoto et al., 2003). También

se ha hablado acerca de la utilización de este método sol-gel para la preparación de zeolitas (Erionita) mediante soluciones acuosas, siendo una de las utilizadas en los últimos años. De acuerdo con Tulinski & Jurczyk (2017) menciona que, debido a sus ventajas de bajo costo de procesamiento, eficiencia energética, alta tasa de producción y rápida productividad de polvo fino homogéneo, la tecnología sol-gel se usa ampliamente y es un proceso efectivo para producir nanopartículas, por ejemplo, Ag-TiO_2, Fe_3O_3, ZnO y TiO_2.

1.5 Microorganismos en el tratamiento aguas residuales

Los microorganismos son organismos como bacterias, hongos y levaduras, es decir, procariontes y eucariontes que midan menos de una décima de milímetro (Sánchez Contreras et al., 2017). Estos microorganismos participan en procesos ecológicos que ayudan al funcionamiento de los ecosistemas, y biotecnológicos que son importantes para diversas industrias, por ejemplo, está la industria farmacéutica, alimenticia y médica (Montaño et al., 2010). De acuerdo con Schenberg (2010, como se citó en Garzón, Rodríguez Miranda and Hernández Gómez, 2017) la biotecnología es un conjunto de tecnologías que contribuyen al desarrollo sostenible, a partir de la solución del problema que se llegue a tratar. Este tipo de tecnologías se han aplicado en varios ámbitos como es la alimentación, la agricultura, la silvicultura, la salud, la producción de materiales y productos químicos y la protección del ambiente. Con respecto al cuidado del medio ambiente, se ha aplicado la biotecnología ambiental, quien desempeñan un papel importante en los sistemas como las plantas de tratamiento de aguas (Llagas Cafloque & Guadalupe Gómez, 2006).

1.5.1 Bacterias

Las bacterias existen en diferentes formas, hay tanto autótrofas como heterótrofas, en su mayoría son heterótrofas. Con respecto a los procesos biológicos de tratamiento, el más importante es el de la eliminación de la materia orgánica por la vía aerobia (oxidación y síntesis de nuevos materiales orgánicos) para la disminución de la concentración del oxígeno disuelto. La materia orgánica se puede oxidar a partir de bacterias heterotróficas bajo condiciones aerobias, donde se obtiene, por ejemplo, dióxido de carbono, agua, amonio y nueva biomasa. Algo importante es que las bacterias pueden hidrolizar a las moléculas, antes de ser incorporadas en las plantas de tratamiento.

Es esencial elegir microorganismos adecuados que pueden brindar la capacidad de poder degradar el tipo de conteniente a tratar, principalmente la disminución de la materia

orgánica de los efluentes contaminado. Con base en ello las características con las que debe contar el microorganismos es la capacidad asimilativa de diferentes carbohidratos (monosacáridos, disacáridos, polisacáridos), la capacidad para producir proteasas (organismos hidrolizantes de proteínas) y la producción de lipasas. “Además, estudiar las potencialidades para la disminución de la DQO a partir de agua residual contaminada, ya sea en forma individual o en consorcios microbianos” (Salgado-Bernal et al., 2012, p.19). En la Tabla 9, se muestran algunas bacterias que se han empelado en diferentes trabajos de investigación para el tratamiento de colorantes contenidos en aguas residuales textiles.

Tabla 9. *Remoción de color de colorantes azo en aguas residuales textiles por bacterias*

Referencia	Bacteria	Colorante	Decoloración (%)
Ayed et al. (2021)	*Pseudomonas putida, Chlorella* y *Lactobacillus plantarum*	Azul Reactivo 40	89
El Bouraie & El Din (2016)	*Aeromonas hydrophila*	Negro Reactivo 5	76
Mustafá et al. (2021)	*Klebsiella pneumoniae* GM-04	Azul disperso 284	95
Mishra & Maiti (2018)	*Pseudomonas aeruginosa* SVM1	Rojo reactivo 21 y naranja reactivo 16	~ 82.7
Mishra et al. (2019)	*Pseudomonas aeruginosa 23N1*	Naranja de metilo	98.6
Sen et al. (2019)	Pseudomonas putida	Naranja de metilo	87
Najme et al. (2015)	*Serratia sp.* RN34	Amarillo Reactivo - 2	95.3
		Rojo reactivo - 120	91.9
Haq et al. (2018)	*Serratia liquefaciens*	Azur B	81.08

Nota. De acuerdo con los estudios que se realizaron utilizando bacterias para la decoloración de diferentes colorantes muestran valores importantes de decoloración.

1.5.2 Biorremediación en colorantes textiles

El tratamiento de colorantes presentes en las aguas residuales derivadas de los procesos industriales después de los proceso de teñido. De acuerdo con Bojalil Carrillo et al. (2021) afirma que:

> El uso de microorganismos o enzimas en el tratamiento de colorantes en efluentes industriales conlleva ventajas importantes con respecto a los métodos fisicoquímicos ya que son respetuosos con el medio ambiente, competitivos en costos y producen menos lodos, además, permiten obtener productos finales no tóxicos con mineralización completa. (p. 194).

Dentro de los compuestos los colorantes de tipo azo son de importancia debido a que son ampliamente utilizados en diferentes tipos de industrias, como la textil (Cortazar-Martínez et al., 2012). Con base a los procesos de teñido que se llevan a cabo en la industria textil, se genera un volumen bastante considerable de colorantes que si estos no son tratados se vierten directamente a los cuerpos de agua causando directamente un problema estético y que además afecta el proceso de fotosíntesis que realizan los organismos que habitan en ese espacio. Con base a lo mencionado anteriormente, el interés por la búsqueda de tratamientos económicos ha ido en aumento, así mismo, se busca que sean eficientes para ello los procesos biológicos son los indicados para la remoción de colorantes. Kandelbauer & Guebitz (2005, como se citó en Bojalil Carrillo et al.,2021) menciona que:

> Las biotecnologías de remoción de colorantes involucran una operación previa a la liberación del agua residual industrial, en la cual se utiliza un biorreactor de tratamiento con cultivos microbiológicos mixtos o axénicos, de naturaleza fungal o bacteriana, que sean capaces de adsorber al pigmento (biosorción) o de romper el grupo funcional de la molécula (biodegradación). Sin embargo, las bacterias son los microorganismos que efectúan la degradación y mineralización más rápida de colorantes azoicos con respecto a otros. También se han desarrollado procesos de remediación enzimática (métodos enzimáticos), con proteínas catalíticas provenientes de estos sistemas celulares. (p. 194)

Para la biorremediación de estos colorantes se pueden utilizar cultivos mixtos conformados por dos grupos a partir de distintas especies; el primer grupo está conformado a partir de microorganismos cuya función es fijar al consorcio microbiano, sin embargo, estos no participan en la degradación del colorante, mientras que segundo grupo está compuesto de

microorganismos que puedan catalizar la lisis de los grupos funcionales de las moléculas para transformarlos en productos metabólicos. También se menciona otra forma de poder de llevar a cabo la biodegradación a partir de microorganismos aislados que son capaces de degradar estos compuestos, y para llevar realizar esta degradación se utilizan técnicas de remediación enzimática (Cortazar-Martínez et al., 2012).

Se han empleado métodos aerobios como anaerobios para la biorremediación de colorante azoicos, en el que a partir de un proceso anaeróbico se lleva a cabo la decoloración completa de dichos colorantes, sin embargo, presenta como desventaja la producción de aminas aromáticas potencialmente mutagénicas y cancerígenas, por ello, el proceso aeróbico se considera el más seguro (Abraham et al., 2008). Por otra parte, la degradación anaeróbica requiere de fuentes orgánicas complejas, como por ejemplo peptona, extracto de levadura o combinación de carbohidratos y fuentes orgánicas complejas (Saratale et al, 2019).

En un estudio realizado por Contreras et al (2019) acerca del uso eficiente de microorganismos como una técnica de biodegradación, utilizaron una cepa de la levadura *Galactomyces geotrichum* KL20A aislada de Kumis (una leche fermentada natural colombiana) para la bioremoción de azul de metileno, tomando en cuenta dos parámetros del proceso de biorremediación en tres niveles diferentes: concentración inicial de colorante y temperatura de crecimiento. El tiempo máximo de exposición de azul de metileno a la levadura fue de 48 h. Los porcentajes de remoción de azul de metileno, por acción de *G. geotrichum* KL20A fueron mayores al 70% en las mejores condiciones de operación. También en otro estudio realizado para la decoloración y degradación del azul de metileno por una cepa de *Sphingomonas paucimobilis* aislada de aguas residuales industriales en condiciones aeróbicas, el grado de decoloración en el medio fue superior al 85% cuando la bacteria se cultivó en una alta concentración del tinte (1000 mg / L) después de un tiempo de retención de 5 días, mientras que la reducción de la DQO fue del 92,99%, lo que sugiere una mineralización de los tintes como resultado. de actividades microbianas (Che Noraini et al., 2012).

1.5.3 Consorcios microbianos

Los “Consorcios Microbianos” son denominados de esta manera ya que están conformados a partir de una asociación natural de dos o más poblaciones microbianas, de diferentes especies, que actúan en conjunto como una comunidad en un sistema complejo, donde todos se benefician de las actividades de los demás. Esta asociación refleja estilos de vida

sinérgicos o sintróficos (que significa “comiendo juntos”) y con base en ello beneficia el crecimiento y el flujo cíclico de nutrientes se conduce más efectiva y eficientemente que en poblaciones individuales (López et al., 2007), lo que funcionalmente, un consorcio microbiano supera la suma de sus partes; sus miembros manteniendo la compatibilidad metabólica y ecológica siempre y cuando las transformaciones ambientales que se generan permitan que ellos coexistan cercanamente (Ochoa Carreño & Montoya Restrepo, 2010).

Cuando se maneja un consorcio de diferentes especies, las cepas participan en la degradación y mineralización del colorante de manera sinérgica, donde cada microorganismo transforma a las moléculas haciéndolas bioasimilables para otros microorganismos. Es así como las aminas aromáticas pueden transformarse en sales minerales a través de enzimas, con actividad hidroxilasa y de fisión del anillo aromático (González-Gutiérrez et al., 2008) pertenecientes a microorganismos que utilizan el oxígeno, tales como los aerobios y los microaerófilos (Bojalil Carrillo et al., 2021).

El empleo de cultivos mixtos (consorcios) resulta en la degradación completa del compuesto xenobiótico, generando como metabolitos finales al amoniaco, agua y dióxido de carbono (Kandelbauer & Guebitz, 2005).

De acuerdo con Ayed et al (2010) realizo un estudio para la decoloración y la eficiencia de degradación del naranja de metilo utilizando un consorcio microbiano, en el cual se utilizaron microrganismos *Sphingomonas paucimobilis, Bacillus cereus ATCC14579, Bacillus cereus ATCC11778* los cuales pudieron decolorar y degradar el naranja de metilo al 84.83% en 48 h. Se obtuvo un aumento significativo en las actividades de azoreductasa, lignina peroxidasa y lacasa en las células después de la decoloración completa. El estudio de fitotoxicidad con plantas no mostró toxicidad de los productos producidos.

Franciscon et al. (2015) estudiaron la degradación del colorante rojo disperso 1 en un reactor aeróbico utilizando un consorcio microbiano, obteniendo una tasa de decoloración del 80% y una reducción del 92% en la demanda química de oxígeno de la solución en 60 h de tratamiento.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

El proceso de fotocatálisis heterogénea para la degradación del colorante azul de metileno se llevó a cabo por medio del catalizador SiO_2+ Erionita, el cual fue sintetizado a partir del método sol-gel para posteriormente ser caracterizado por diferentes técnicas; Difracción de rayos – X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia Dispersa de Energía (EDE). Posteriormente, se realizaron pruebas de degradación bacteriana a partir de consorcios microbianos utilizando diferentes cepas bacterianas (*Pseudomona putida B44, Serratia K120, Pseudomona B03, Serratia Mc107* y *Mc156)* y fue evaluada la degradación por medio de espectrofotometría UV/Vis.

2.1 Síntesis del catalizador

Se utilizó SiO_2+ Erionita, el cual se obtuvo por el método sol-gel (Innocenzi et al., 2008).

1.1. **Formación del sol.** Se mezcló el precursor de silicio (TEOS) en el solvente (etanol) con zeolita tipo Erionita (preparado por el departamento de zeolitas del ICUAP) y se agitó continuamente durante 30 min.

1.2. **Formación del gel.** Se agregó 1 ml de gota a gota el agente gelificante (ácido fluorhídrico) con temperatura (80°- 90° C) y agitación controlada.

1.3. **Envejecimiento.** Se dejó secar por evaporación a 100°C por 24 horas hasta obtener cristales pequeños.

1.4. **Secado.** Se depositó el polvo en canaleta de cuarzo y se mantuvo en horno de alta temperatura (AYSPEL modelo H-A800) con flujo nitrógeno a 450°C por 10 horas.

1.5. **Calcinado.** Se depositó el polvo en cápsula de porcelana y se calcino en mufla (Terlab, modelo MA20D) a 650°C por 4 horas.

2.2 Caracterización del catalizador

2.2.1 Difracción de Rayos – X (DRX)

Se analizaron aspectos relacionados con la estructura cristalina de los diferentes soportes que posé el catalizador SiO_2.

Se obtuvieron los patrones de difracción de rayos-X del catalizador SiO_2, con un difractómetro (Bruker modelo D8 Discover), se utilizó como fuente Cu Kα y un detector lineal (ojo de lince “lynx eye”); el cual mide los ángulos de incidencia con un inicio de 5° y un término de 90°. Se identificaron las fases presentes mediante la comparación de los

patrones de difracción obtenidos con los de la base de datos PDF-4-+2014RBD, la cual está conformada entre otras por la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD por sus siglas en inglés).

2.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Se obtuvieron imágenes de la morfología superficial del catalizador SiO_2 (tanto de electrones secundarios como de electrones retrodispersados).

El catalizador SiO_2 fue analizado con un microscopio electrónico de barrido (JEOL modelo JSM-6610 LV) con filamento de tungsteno y con bajo vacío, operando a 20 kV, con el cual se obtuvieron las imágenes de la morfología superficial.

2.2.3 Espectroscopia Dispersa de Energía (EDE)

Para obtener la composición química elemental se utilizó un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6610 LV) mismo que se usó para MEB ya que tiene acoplado un espectrofotómetro de dispersión de energía de rayos - X y un detector Oxford modelo INCA. Se analizaron 3 regiones de cada muestra para obtener un promedio de la composición química elemental

2.3 Prueba de oscuridad

Se realizó la prueba de oscuridad a partir de una solución del colorante azul de metileno en presencia del catalizador SiO_2 -Erionita. La muestra se colocó en la oscuridad sin presencia de luz solar durante un lapso de 24 horas con el objetivo de determinar si hubo una degradación del colorante mediante el catalizador. El análisis de la muestra se llevó a cabo mediante espectrofotometría UV/Vis.

2.4 Pruebas de degradación fotocatalítica

Para la realización de las pruebas de degradación fotocatalítica se utilizó un reactor solar no concentrado de tipo Cilindro Parabólico Compuesto (CPC), como se muestra en la Figura 4, el cual está estructurado a partir de 5 tubos (reactor) de Pyrex-BoroSilicato de 1.5 pulgadas de diámetro y 1 metro de longitud; poseen bajo contenido en hierro el cual provoca que parte de la luz UV sea absorbida por este, de los cuales únicamente se estudiaron 2 (catalizador y el blanco), aireadores (ELITE 799) con el fin de mantener disperso al catalizador por todo el reactor y así tener más contacto con la muestra de azul de metileno y apoyar la oxidación con la introducción de aire, láminas de aluminio de alta

reflactancia acondicionados para una buena obtención de ángulo de aceptancia, su función es que los rayos que incidan sobre la superficie sean concentrados sobre el perímetro del reactor tubular Pyrex, conexiones para los tubos utilizados, condensadores para evitar la evaporación de las muestras, bomba de recirculación de agua para mantener el agua en los condensadores y no se evapore. El colector solar se colocó con orientación de norte a sur, (ángulo de inclinación de 19°, latitud que corresponde a la ciudad de Puebla) este fue montado en la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP. La radiación solar fue monitoreada con ayuda de los datos del meteorológico nacional (CONAGUA, 2011).

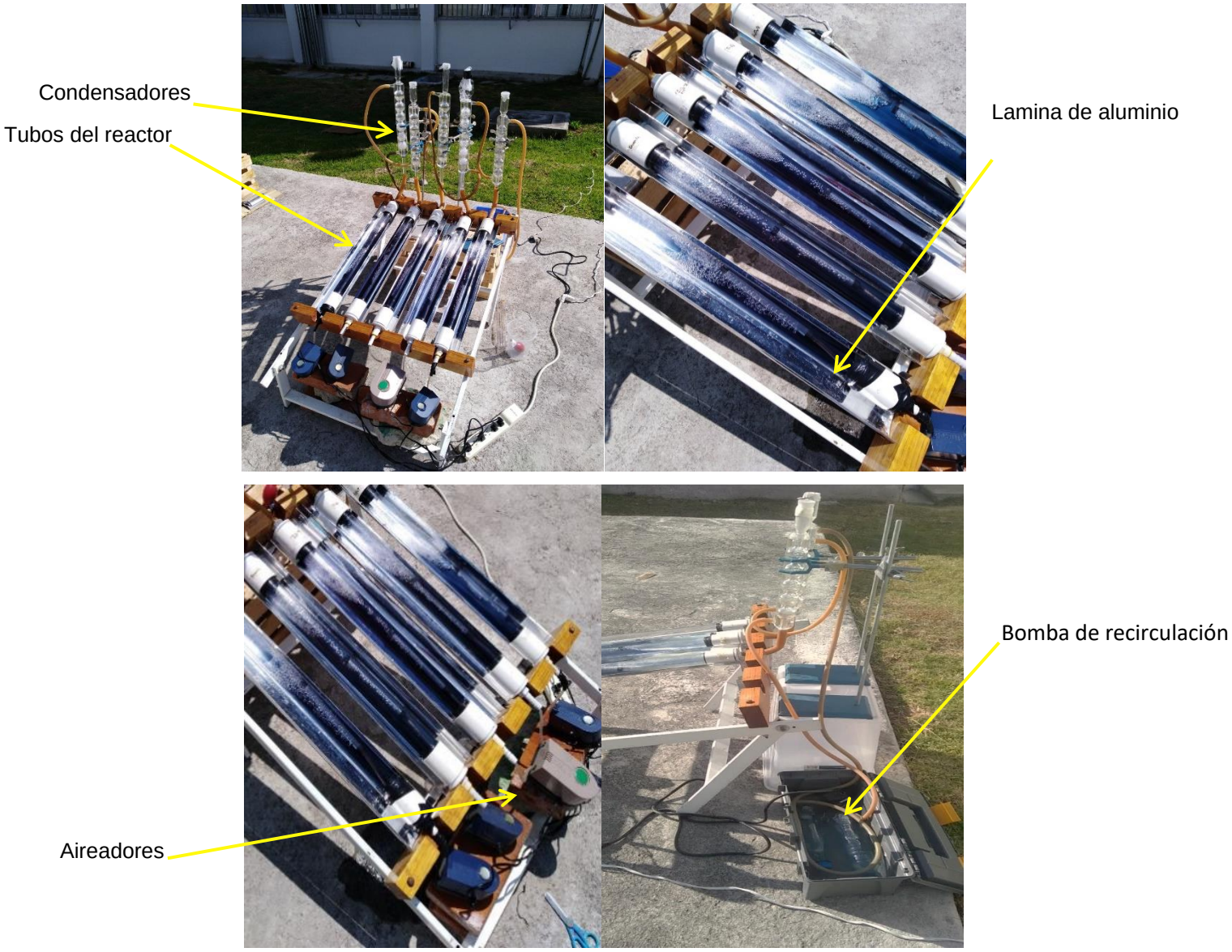


Figura 4. *Colector solar para el proceso de fotocatálisis*

Procedimiento

1. Se preparó 1.6 litros de solución de colorante de azul de metileno a 50 ppm, y se colocó 800 ml de la solución de metileno en cada uno de los 2 reactores.
2. Se pesó 0.08 g de SiO_2 + Erionita (75 % - 25 %) y se colocó en uno de los tubos dejando un tubo como blanco.
3. Se colocó el colector solar en un área donde la incidencia de los rayos de soy no tuvieran interferencias, con una orientación norte a sur. Se instaló a las 10 am, y se retiró a las 4 pm.
4. A partir de poner en marcha el colector solar, tomando nota de la hora de inicio, se tomó una alícuota cada dos horas.
5. Al finalizar el proceso fotocatalítico, se recolectó la muestra sobrante, y se almaceno a temperatura ambiente sin incidencia solar.

2.5 Pruebas de degradación bacteriana

Para las pruebas de degradación bacteriana se utilizaron 5 cepas diferentes tres de ellas provienen de jales de minas. Estas fueron aisladas y caracterizadas como promotoras del crecimiento vegetal mientras que las dos restantes se aislaron en un sitio con derrame de hidrocarburos. Estas cepas fueron *Pseudomona putida B44, Serratia K120, Pseudomona B03, Serratia Mc107* y *Mc156*. En la Tabla 10, se muestra el nombre, género y lugar de aislamiento de las cepas utilizadas. Las cepas se mantuvieron en caldo Luria Bertani (LB) hasta la utilización.

Tabla 10. *Cepas utilizadas para la degradación bacteriana (Fuente: Mendoza-Hernández et al., 2015a y Mendoza-Hernández et al., 2016b)*

Cepa	*Género*	Lugar de aislamiento
B03	*Pseudomona*	Sitio contaminado con hidrocarburos
B44	*Pseudomona*	Sitio contaminado con hidrocarburos
K120	*Serratia*	Jales mineros
MC107	*Serratia*	Jales mineros
MC156	*Serratia*	Jales mineros

2.5.1 Propagación

Se utilizó 200 µl. de cada cepa en tubos de ensayo con 10 ml de caldo LB por 96 horas en el horno de incubación a 30° C con una agitación de 80 rpm. Pasadas las 96 horas se preparó 5 matraces Erlenmeyer con 200 ml de caldo LB, cada uno y se hizo una segunda propagación con 3 ml de inoculo de las cepas ya aisladas durante 120 horas (mismas condiciones).

2.5.2 Obtención del inóculo

Posteriormente al haber realizado la propagación, se utilizaron 5 tubos Falcon para obtener la masa celular de una de las cepas. Estos tubos fueron pesados antes de dicha actividad para que, al finalizar, se obtuviera el peso de las bacterias. A continuación, se muestran los pasos a seguir para la obtención del inóculo:

1. Se limpió y de activó la campana biológica de luz UV para poder comenzar la actividad.
2. Se colocó en la campana de luz UV los 5 matraces Erlenmeyer que contienen las bacterias y los 5 tubos Falcon, y se agregaron los 5 tipos de bacterias respectivamente.
3. Una vez etiquetado cada tubo por cada cepa, se añadieron 50 ml de caldo LB de cada cepa a cada tubo Falcon correspondiente.
4. Se colocó en la centrifuga a 8000 rpm por 8 minutos.
5. Se sacaron los tubos de la centrifuga y se colocó el sobrenadante en un vaso de precipitado para su desecho.
6. Se repitió desde el paso 3 hasta terminar con los 200 ml de muestra que contiene cada matraz.
7. Se pasaron los 5 tubos Falcon con la masa celular obtenida.

2.5.3 Preparación de buffer de fosfatos

Se suspendieron las bacterias en 20 ml de una solución buffer de fosfatos pH 7.4, 0.1 M. Esta suspensión bacteriana se utilizó como inoculo.

2.5.4 Preparación del mínimo mineral

Se preparó el medio mínimo mineral sobre la solución de azul de metileno que sobro del proceso de fotocatálisis. De las muestras sobrantes de la fotocatálisis se tomó 300 ml a los

cuales se les añadieron las siguientes cantidades de minerales como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. *Preparación de medio mínimo mineral (Fuente: Mendoza-Hernández et al., 2016b).*

	Compuesto	No. De inventario	Para 1 litro g necesarios	Para 300 ml g necesarios
1	KH_2PO_4	37	0.04 g	0.12 g
2	K_2HPO_4	38	2 g	0.6 g
3	$MgSO_4$	61	0.2 g	0.06 g
4	$CaCl_2$	18	0.1 g	0.01 g
5	$FeSO_4$	58	5 ml	0.0015 g
6	H_3BO_3	3	2 mg	0.0006 g
7	$ZnSO_4$	67	5 mg	0.0015 g
8	Na_2MoO_4	45	1 mg	0.0003 g
9	$MnSO_4$	59	3 mg	0.0009 g
10	$CoSO_4$	55	1 mg	0.0003 g
11	$CuSO_4$	56	1 mg	0.0003 g
12	$NiSO_4$	63	1 mg	0.0003 g

2.5.5 Preparación de consorcios

Los consorcios se hicieron de la siguiente manera dividiéndolas en las muestras presentes por duplicado.

- ✓ Consorcio 1. *Serratia Mc107 y Pseudomona putida B44*
- ✓ Consorcio 2*. Serratia K120, Pseudomona B03 y Pseudomona putida B44*
- ✓ Consorcio 3. *Serratia Mc107, Serratia Mc156 y Pseudomona putida B44*

2.5.6 Ensayos de degradación bacteriana

Se llevaron a cabo a partir de la solución coloreada obtenida al final del proceso fotocatalítico. Se tomo en cuenta 2 muestras, el catalizador y el blanco como se muestra en

la Figura 5. Las muestras se hicieron por duplicado. Cada muestra de 50 ml, por lo que consto de un total de 12 muestras. A cada uno de los ensayos, se le colocó medio mínimo mineral para que las bacterias lograran sobrevivir. Posteriormente se colocaron en horno de incubación a 30°C sin agitación durante 5 días y se tomó una alícuota de 10 ml a cada uno de los ensayos diariamente para la evaluación de la degradación del colorante mediante espectrofotometría UV- Vis.

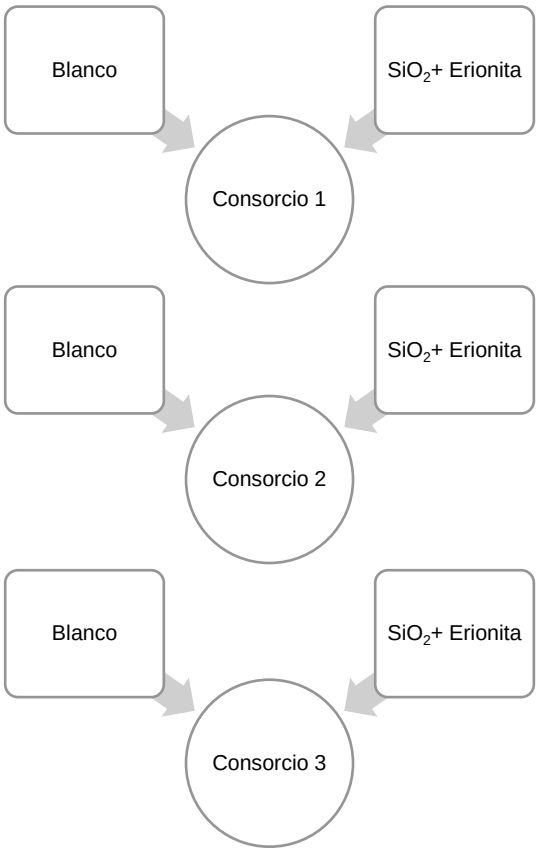


Figura 5. *Ensayos de la degradación bacteriana (Fuente: realización propia)*

2.5.7 Evaluación de la degradación mediante espectrofotometría UV/Vis

Se utilizo disoluciones de azul de metileno con una concentración conocida de 10, 20, 30. 40 y 50 ppm para realizar la curva de calibración. Se midió la absorbancia de todas las muestras obtenidas en las pruebas de degradación con un espectrofotómetro (ESPECTRONIC® 20 GENESYS) tomando como referencia una longitud de onda para el azul de metileno de 650 nm.

Con los resultados se obtuvieron las concentraciones de las diferentes muestras y así poder calcular el porcentaje de degradación mediante la fórmula 2.4.

$$\% = \frac{\boldsymbol{C_0 - C}}{\boldsymbol{C_0}} * \boldsymbol{100}$$

(1)

Donde C_0 es la concentración inicial en ppm y C es la concentración de la solución (ppm) en un tiempo determinado.

2.5.8 Cinética de la reacción

La cinética química se encarga del estudio de la velocidad de reacción, considerando todos los factores que influyen sobre la misma y explicando la causa de la magnitud de esa velocidad. Las ventajas que ofrece el realizar un estudio de cinética son las siguientes:

1. Profundizar la naturaleza de los sistemas reaccionantes, como se forman y se rompen los enlaces químicos, así como estimar sus energías y estabilidades.
2. Proporciona información sobre la fuerza relativa de los diferentes enlaces químicos y la estructura molecular de los compuestos que intervienen en la reacción, a través de manera en que reacciona.

Las expresiones de velocidad que definen el orden de reacción se dan por las siguientes ecuaciones (Azizi et al., 2015):

Cinética de orden 0:

$$-\frac{\boldsymbol{dC}}{\boldsymbol{dt}} = \boldsymbol{k_0}$$

(2)

Cinética de orden 1:

$$-\frac{\boldsymbol{dC}}{\boldsymbol{dt}} = \boldsymbol{k_1 C}$$

(3)

Cinética de orden 2:

$$-\frac{dC}{dt} = k_2 C^2 \tag{4}$$

Integrando las ecuaciones 2.3 y 2.4 desde C hasta C_0 se obtienen las siguientes expresiones:

Cinética de orden 0:

$$C = C_0 - k_0 t \tag{5}$$

Cinética de orden 1:

$$lnC = lnC_0 - k_1 t \tag{6}$$

Cinética de orden 2:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \tag{7}$$

Donde *C* es la concentración del colorante en *M* a un tiempo t; C_0 es la concentración inicial del colorante (M); *t* es el tiempo y *k* la constante cinética.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización fisicoquímica

3.1.1 Estructura cristalina del catalizador SiO_2 - Erionita

Para esta técnica se analizó SiO_2 + Erionita sintetizado combinado mediante el proceso de síntesis de sol-gel, como se mencionó en el capítulo 2, la base de datos con la cual se comparó el difractograma obtenido fue PDF-4-+2014RBD.

En la Figura 6, se muestra el difractograma obtenido del SiO_2, en donde se obtuvo como resultado la coincidencia con el compuesto hidrato de hidróxido de fluoruro de aluminio, con el número de ficha PDF 00-004-0196 Al (OH, F)$_3$ 0.375 H_2O Aluminum Fluoride Hydroxide Hydrate que corresponden a la líneas color verde y la Erionita tipo Fausajita, con el número de ficha PDF 00-002-0010 Na_2 Ca Al_4 Si_{10} O_{28} ·20 H_2O Faujasite, sin embargo, la base de datos indica que estas señales no son exactas y precisas. En el difractograma se puede observar la banda ancha en mayor proporción en los ángulos 2Θ: 15° y 30° que corresponde al SiO_2, y que debido a su contenido de partículas amorfas presentan una banda ancha predominante. Con base en un estudio realizado por Martínez et al (2006) prepararon SiO_2, amorfo mediante el procedimiento sol-gel y a su vez lo sometieron a un tratamiento térmico, el cual lo analizaron utilizando el refinamiento de Rietveld. En dicho estudio ubicaron un pico amorfo en 2θ = 23º. En otros estudios se obtuvieron resultados similares con picos amorfos para SiO_2 en 2θ = 22º (Zhang et al., 2011) y 2θ = 21. 8º (Musić et al., 2011).

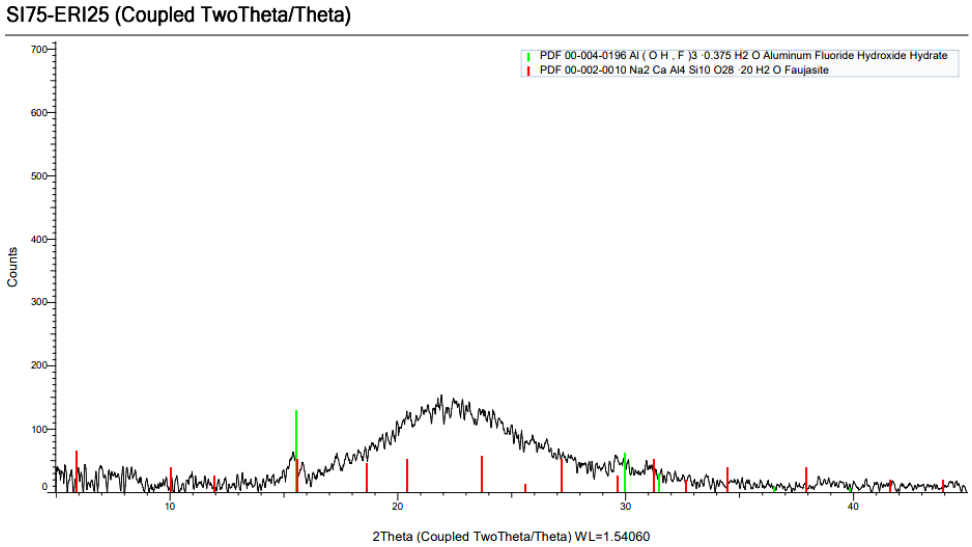
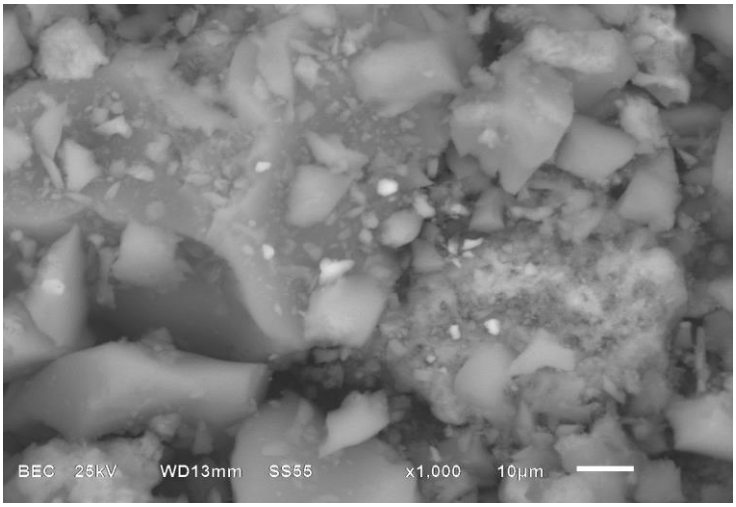


Figura 6. *Patrón de difracción de rayos X del catalizador SiO_2 -Erionita*

3.1.2 Morfología de las partículas del catalizador SiO_2 - Erionita

Para el análisis de microscopia electrónica de barrido se obtuvieron micrografías del catalizador SiO_2 - Erionita. Se hicieron tomas desde los 1000x, 3000x y 600x aumentos, sin embargo, en este caso únicamente se tomaron 1000x y 3000x aumentos con ambos detectores (electrones secundarios y retrodispersados). En la Figura 7, la micrografía A corresponde al aumento 1000x obtenida a partir del detector de electrones retrodispersados y la micrografía B con aumento de 3000x obtenida con detector de electrones secundarios. Para ambas micrografías las partículas se muestran irregulares y de gran tamaño. En un estudio realizado por Sarikaya et al., (2016) para producción de SiO_2 nano amorfo a partir de pirofilita de Malatya, utilizaron microscopia electrónica de barrido (MEB) y se observaron que los tamaños de las partículas eran amorfos y su distribución de gran tamaño.

A



B

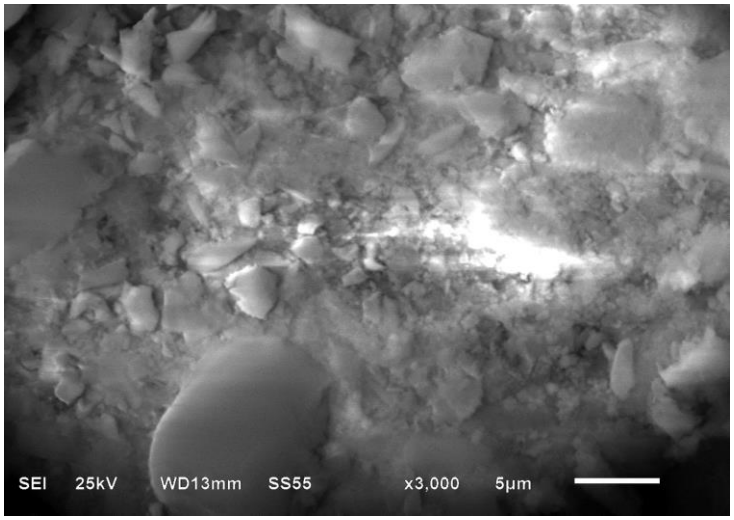


Figura 7. *Micrografía de del catalizador SiO_2 -Erionita amplificada a 1000x (A y B)*

3.1.3 Composición química elemental del catalizador SiO_2 - Erionita

Para esta tercera caracterización se obtuvieron la composición química elemental del catalizador SiO_2 -Erionita sintetizado. Se realizaron tres mediciones en posiciones aleatorias para la muestra. En la Figura 8, se muestra tanto la imagen de estas posiciones como el espectro de los niveles energéticos del catalizador SiO_2 -Erionita (75%-25%) obtenido de dicho análisis.

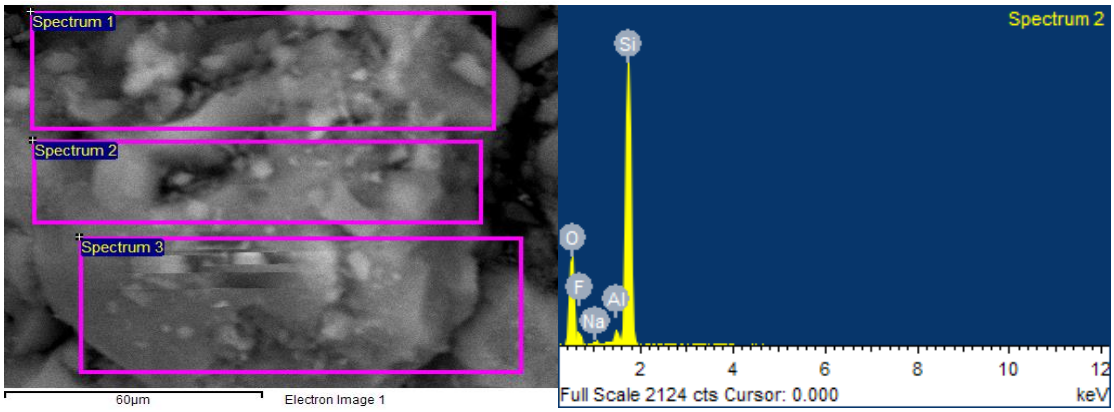


Figura 8. *Análisis de composición química elemental del catalizador SiO_2 -Erionita*

En la Tabla 12, se muestran los porcentajes en peso (promedio) de cada elemento identificado. El promedio de las tres zonas analizadas indica que contiene diversos elementos químicos. Los más importantes con mayor peso, se encuentran: oxigeno con 45% silicio con 31.67 % que corresponde al oxido de silicio sintetizado; flúor con 20.14 % como residuo del proceso de síntesis de del oxido de silicio en donde se utiliza acido fluorhídrico (HF) como agente gelificante y por último el sodio con 1.14%, aluminio con 1.65%, potasio con 0.22% y calcio con 0.19 % los cuales corresponden a la composición química de la Erionita al igual que el silicio y aluminio (Curi et al., 2006).

Tabla 12. *Composición química elemental de SiO_2 -Erionita*

Elemento	O	F	Na	Al	Si	K	Ca	Total
Promedio	45.00	20.14	1.14	1.65	31.67	0.22	0.19	100.0

Nota: los valores de cada uno de los elementos representan el promedio de tres espectros. El peso está expresado en porcentaje (%)

3.2 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul de metileno

3.2.1 Curva de calibración

Se analizo el colorante azul de metileno, para ello se prepararon cinco soluciones de este colorante a diferentes concentraciones conocidas (50, 40, 30, 20 y 10 ppm), y usando la de mayor concentración 50 ppm se realizó un barrido y se identificó la máxima absorbancia con la longitud de onda correspondiente al colorante en λ=660 nm. Con estos datos se realizó una curva de calibración que permita determinar el grado de degradación del azul de metileno en las pruebas fotocatalíticas y microbiológicas como se observa en la Figura 9.

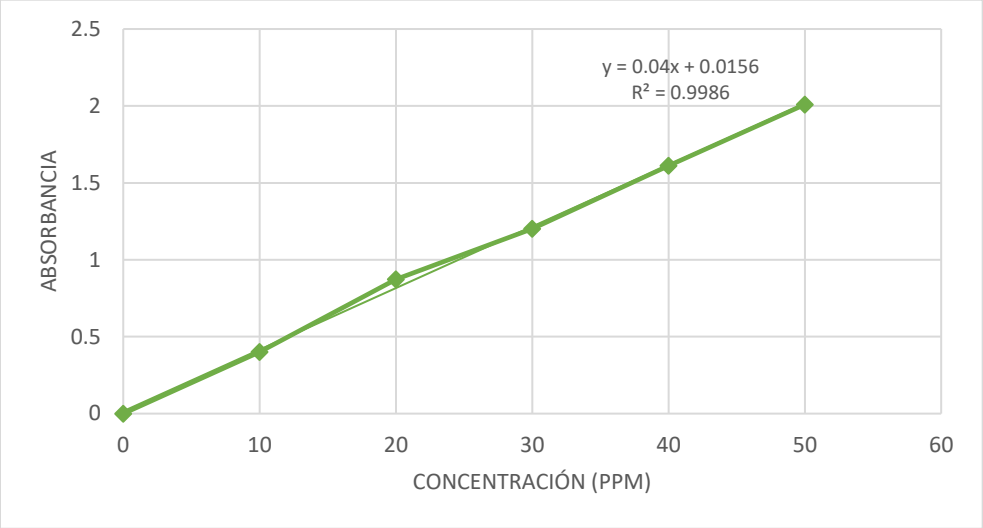


Figura 9. *Curva de calibración de azul de metileno*

3.2.2 Prueba de oscuridad para azul de metileno con el catalizador SiO_2 -Erionita

Para esta prueba se puso en contacto el SiO_2 -Erionita con la muestra de azul de metileno durante 24 horas en total oscuridad. Al pasar este lapso se analizó la muestra y se determinó si el catalizador logró absorber alguna concentración del colorante. En la Figura 10, se puede observar dos espectros de absorción UV-Vis, el blanco el cual es el colorante azul de metileno a las 0 horas y el azul de metileno con el catalizador SiO_2 -Erionita después de 24 horas donde se logra percibir que estos espectros permanecen prácticamente inalterables. De igual manera con respecto a la concentración como se muestra en la Tabla 15, la degradación fue 1.69% lo que indica que no hubo una adsorción relevante del colorante por medio del catalizador.

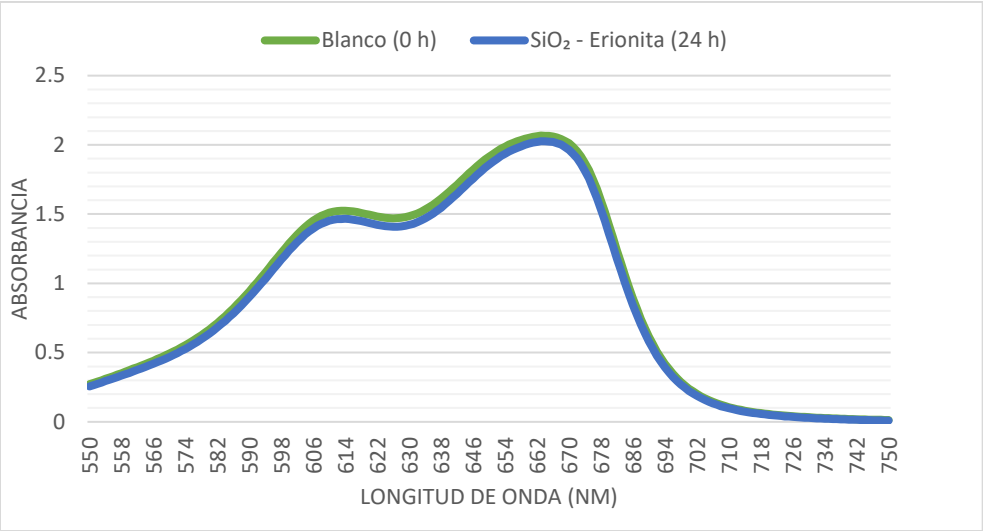


Figura 10. *Espectro de UV-VIS de la prueba de oscuridad para el colorante azul de metileno*

Tabla 13. *Porcentaje de degradación de la prueba de oscuridad*

	Tiempo de exposición (horas)	Absorbancia (u.a) a 660 nm	Concentración (ppm)	Degradación (%)
Blanco	0	2.05	50.86	0
SiO_2 -Erionita	24	2.00	50	1.69

3.2.3 Prueba de degradación para azul de metileno sin SiO_2 -Erionita

En la Figura 11, se presentan los espectros de absorción UV-Vis que muestran la degradación del colorante mediante la obtención de alícuotas cada 2 horas en un tiempo total exposición de 6 horas, asimismo se aprecia una notable degradación desde la segunda hora, misma que va disminuyendo al pasar el tiempo total de exposición. Esto indica que a pesar de que no contiene un catalizador, la radiación solar actúa de manera favorable en la concentración del colorante. De acuerdo con la Tabla 13, la degradación fue notable en la hora 4 con 24.425% finalizando en la hora 6 con 39.288%.

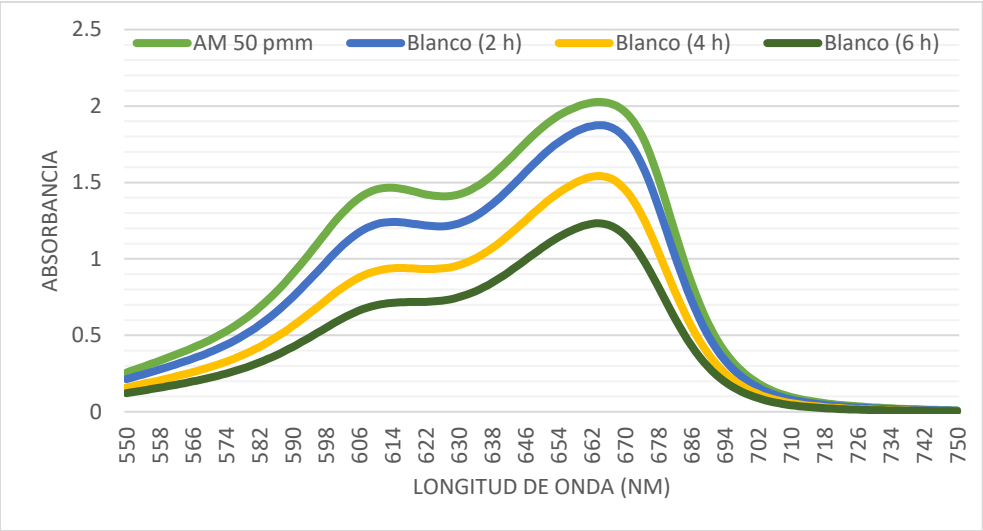


Figura 11. *Espectro de UV-VIS del colorante azul de metileno sin catalizador SiO_2 -Erionita*

Tabla 14. *Azul de metileno sin catalizador SiO_2 -Erionita*

Tiempo de exposición (horas)	Absorbancia (u.a) a 660 nm	Concentración (ppm)	Degradación (%)
0	2.00	50	0
2	1.85	46.08	7.82
4	1.52	37.78	24.42
6	1.21	30.35	39.28

3.2.4 Prueba de degradación para Azul de Metileno con SiO_2 -Erionita

En esta prueba de degradación se tomó en cuenta el catalizador SiO_2 -Erionita con las mismas condiciones que la prueba anterior. Es decir, se obtuvo una alícuota cada 2 horas en un tiempo total de exposición de 6 horas. En la Figura 11, se muestra los diferentes espectros que se obtuvieron de las alícuotas a lo largo del tiempo de exposición y también el espectro absorción UV-Vis inicial del azul me metileno a 50 ppm que se utiliza como referencia para evaluar la degradación por el proceso fotocatalítico. A partir de los espectros, se aprecia notablemente la degradación del colorante a las 2 horas con 38.02 % y a las 4 horas con 55. 53%, sin embargo, a las 6 horas se observa una disminución en la degradación de 48.56%, esto pudiendo ser por la evaporación de la solución acuosa afectando la disminución en la concentración, sin embargo, se observa que la muestra se desvanece considerablemente en λ=610 nm puesto que se encuentra por debajo de los

demás espectros. La degradación del colorante azul de metileno en presencia del catalizador es notable debido a que se encuentra aproximadamente por arriba del 10 % del blanco. Cabe recalcar que la degradación del colorante se está llevando a cabo con la ayuda de la radiación solar. La Tabla 14 presenta los porcentajes de degradación a lo largo del proceso fotocatalítico.

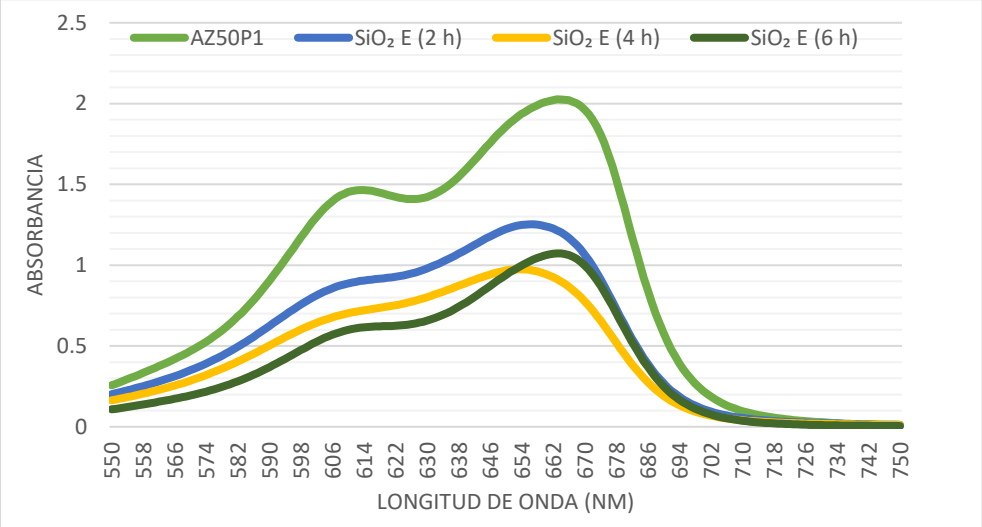


Figura 12. *Espectro de UV-VIS del colorante azul de metileno con SiO_2 – Erionita*

Tabla 15. *Azul de metileno con SiO_2 -Erionita*

Tiempo de exposición (horas)	Absorbancia (u. a) a 660 nm	Concentración (ppm)	Degradación (%)
0	2.00	50	0
2	1.24	30.98	38.02
4	0.94	22.23	55.53
6	1.06	25.71	48.56

La degradación del colorante azul de metileno en el proceso de fotocatálisis heterogénea mostro resultados aceptables mediante la aplicación del catalizador SiO_2 -Erionita en presencia de luz solar. En estudios realizados con fotocatalizadores como TiO_2/SiO_2, se ha alcanzado hasta un 45% en la remoción de azul reactivo 69 (Barrera-Andrade et al., 2011). En otro estudio realizado mediante Fe_3O_4 / SiO_2 / TiO_2 (50% conteniendo TiO_2 en composite) donde la presencia de SiO_2 como barrera entre Fe_3O_4 y TiO_2 no solo mejora las

propiedades fotocatalíticas, sino que también proporciona la capacidad de adsorber las propiedades en el compuesto eliminando hasta un 87.3% de azul de metileno agua mediante procesos de adsorción y fotocatalíticos (Filsi et al., 2017). Es decir, si en el sistema fotocatalítico no hubiese habido una evaporación de la solución acuosa, probablemente hubiera alcanzado una degradación arriba de 70% por las características del catalizador. De acuerdo con la literatura, el catalizador SiO_2 - Erionita también se ha utilizado para la degradación de agua residual de la industria textil (Sánchez Limón, 2020). Al igual que también se ha sintetizado el SiO_2 por método sol-gel para la degradación de azul de metileno (Nandanwar et al., 2015).

3.3 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos

En las pruebas de degradación microbiológica se utilizó un sistema con el colorante sin el paso por el proceso fotocatalítico. En la Tabla 16, se muestran los resultados obtenidos, en donde se encontró que el consorcio C2 fue el que obtuvo una mayor degradación del 58.01%, seguido del consorcio C3 con un 49.64%, y finalmente el que menos degradó fue el consorcio C1 con 36.6%, como se puede observar en la Figura 13. En la Tabla 17, se muestran los resultados de degradación del uso de los consorcios microbianos después del proceso fotocatalítico. El consorcio C2 fue el que mejor degradó con un 90.25%, seguido de C3 con 82.90% y finalmente el consorcio C1 con 78.16% como se muestra en la Figura 14. El consorcio C2 está formado por *Serratia K120, Pseudomona B03* y *Pseudomona putida B44* lo que concuerda también en un trabajo realizado por Sánchez Limón (2020) en el que utilizo consorcios, siendo el más favorable el que contenía bacterias *Escherichia coli, Pseudomona putida B03* y *Serratia K120*, el cual se aplicó en la degradación de agua residual textil utilizando un proceso combinado fotocatalítico – microbiológico.

Tabla 16. *Porcentaje de degradación de la solución de azul de metileno sin tratamiento fotocatalítico*

Degradación (%)			
Tiempo (días)	C1	C2	C3
1	29.33	46.90	40.63
2	29.84	49.64	40.91
3	34.61	53.28	45.36
4	34.68	54.39	45.71
5	36.6	58.01	49.64

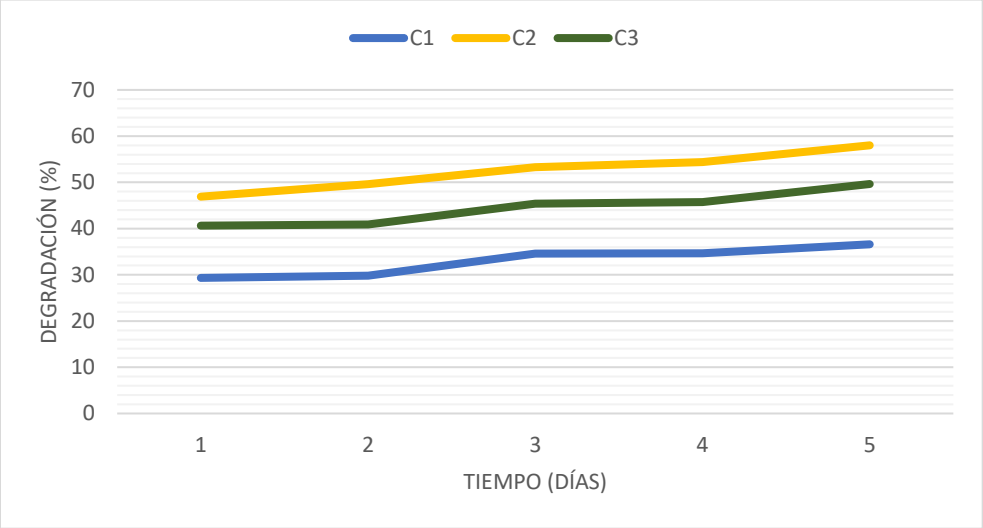


Figura 13. *Biodegradación del blanco con consorcios microbianos después del proceso fotocatalítico*

Tabla 17. *Porcentaje de degradación del azul de metileno con consorcios microbianos después del proceso fotocatalítico*

	Degradación (%)		
Día	C1	C2	C3
1	71.47	68.50	72.84
2	72.25	79.04	75.01
3	73.27	81.27	78.95
4	73.95	84.35	80.28
5	78.15	90.24	82.90

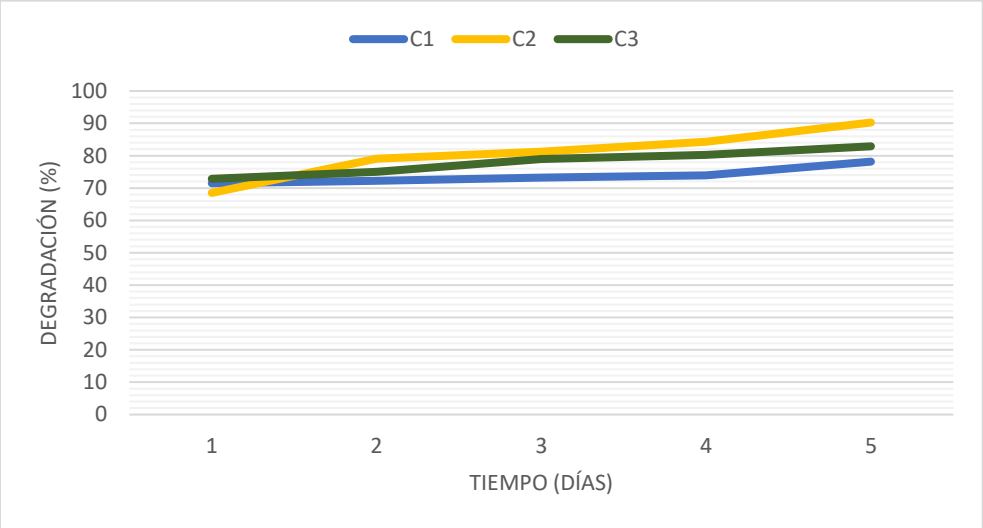


Figura 14. *Biodegradación del azul de metileno con SiO_2 -Erionita después del proceso fotocatalítico*

Los procesos microbiológicos han sido implementados para la biodegradación de diversos contaminantes como colorantes y tintes azo (Mustafá et al. 2021) a partir de microorganismos, entre ellos se encuentran las bacterias como la *Pseudomonas putida* (Sen et al. ,2019), *Serratia sp.* RN34 (Najme et al., 2015) y *Serratia liquefaciens* (Haq et al., 2018) las cuales reducen los enlaces azo de los colorantes textiles, siendo este proceso el paso inicial en la degradación bacteriana de colorantes de tipo azo. Se ha obtenido la completa mineralización de colorantes de tipo azo utilizando consorcios microbianos en condiciones anaerobias (González-Gutiérrez et al., 2009). También en un estudio se aislaron cepas a partir de un lodo activado de un sistema aerobio-anaerobio en el que se

degrado colorantes azo con diferentes estructuras químicas, mediante cepas de *Pseudomonas*, en condiciones anóxicas (Cortazar-Martínez, 2012).

3.4 Cinética de reacción del proceso de degradación combinado

Se determinó el orden de reacción para el catalizador SiO_2 -Erionita, empleando las tres ecuaciones (de orden 0, 1 y 2) mencionadas en el capítulo 2. A continuación en la Tabla 16, se presentan los datos obtenidos del orden de reacción para cada consorcio y en las Figuras 15, 16 y 17, los gráficos para el orden que mejor se ajustó a una línea recta.

Tabla 18. *Orden de reacción para cada consorcio*

	Orden de reacción		
Consorcio	0	1	2
1	0.62	0.98	0.92
2	0.85	0.93	0.67
3	0.71	0.97	0.86

El mejor ajuste gráfico para el consorcio 1 fue de orden 1 con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.98$ a comparación del orden 0 y 2. En la Figura 15 se muestra la gráfica que se aproxima más a una recta. Para el caso del consorcio 2 fue de orden 1 con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.93$ en comparación del orden 0 y 2. En la Figura 16 se puede observar la gráfica donde se aproxima más a la recta. Por último, el consorcio 3 también de orden 1 con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.97$ lo que indica que a comparación del orden 0 y 2, este se acerca más a la recta, como se muestra en la Figura 17.

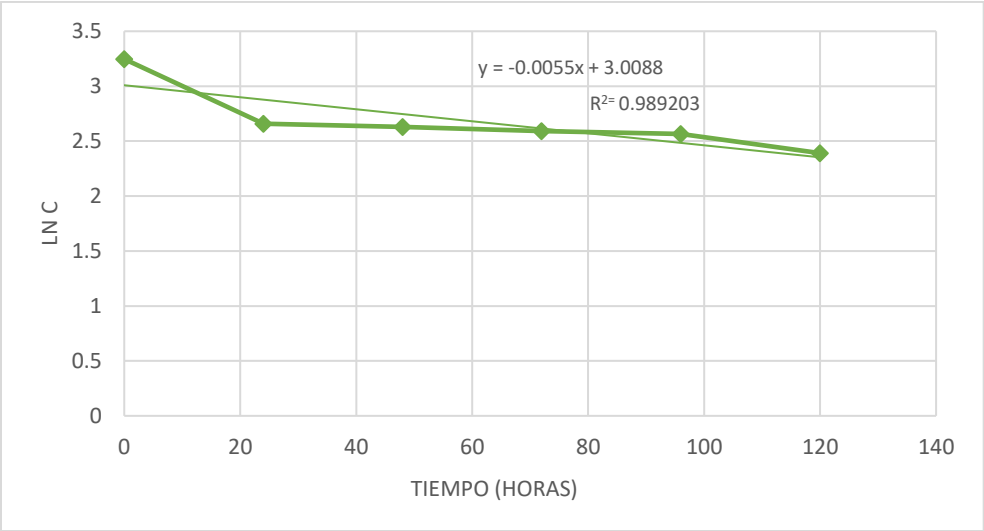


Figura 15. Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C1

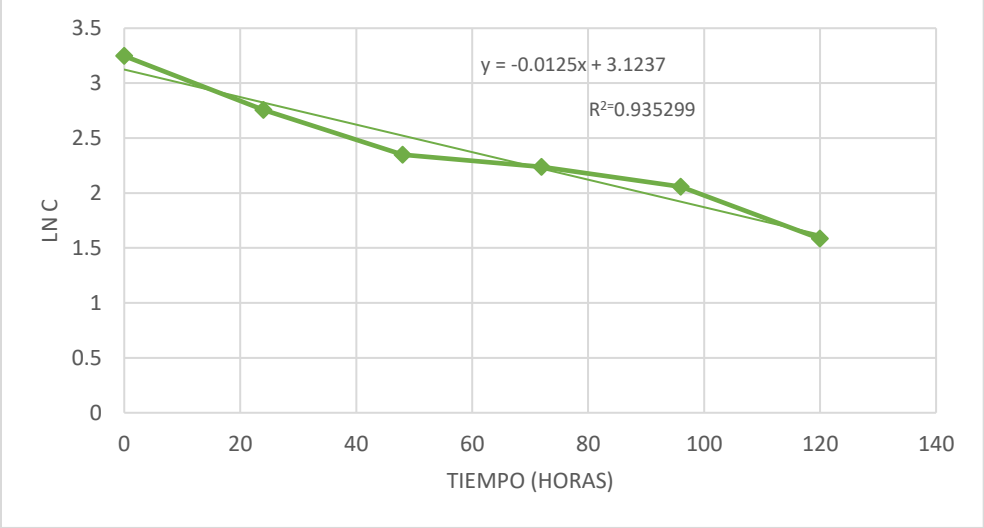


Figura 16. Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C2

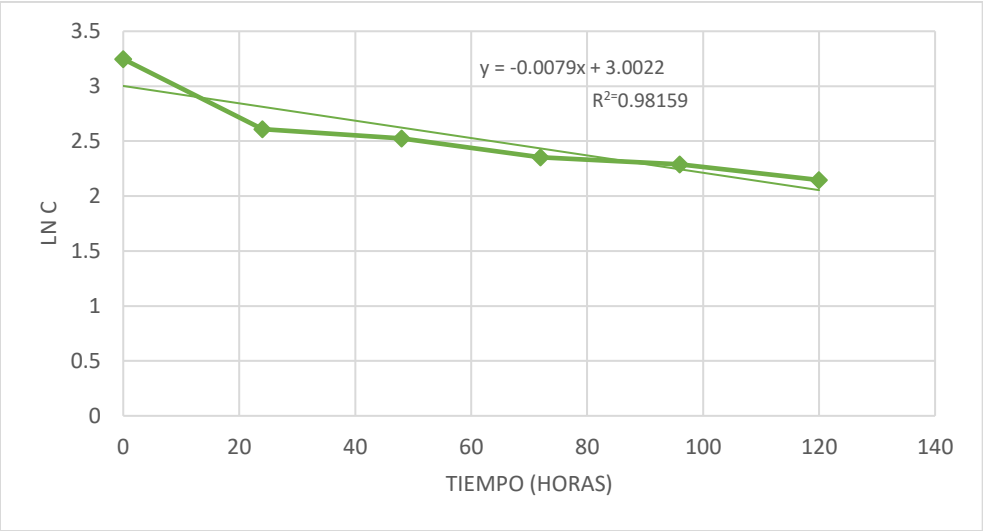


Figura 17. Ajuste grafico de la cinética del SiO_2 -Erionita y el consorcio C3

De acuerdo con lo mencionado antes, se puede decir que la reacción únicamente depende de un reactivo, en este caso de la concentración del colorante azul de metileno e inclusive se sabe que la mayoría de los procesos aerobios de tratamiento de aguas residuales se describen mejor mediante una relación cinética de orden 1 (Girald et al., 2005).

Sánchez Limón (2020) en el estudio que realizó para la degradación de agua residual de la industria textil mediante un sistema combinado fotocatalítico – microbiológico, donde obtuvo un 25% en la degradación del colorante en el proceso de fotocatálisis mejorando la degradación con el proceso microbiológico obteniendo aproximadamente un 85 % en la degradación del colorante. Este tipo de sistemas híbridos o secuenciados (Waghmode et al., 2019) en el que se aplica primeramente un proceso de degradación fotocatalítico seguido de un proceso de degradación microbiológico, es una excelente opción para la remoción de contaminantes recalcitrantes (Cortazar-Martínez, 2012) como colorantes y tintes, logrando remover la mayor cantidad del colorante presente en soluciones acuosas que varían entre un 70 y 90 % (Cuevas Aragón, 2009).

CONCLUSIONES

- A partir de la experimentación que se realizó, se obtuvieron resultados capaces de confirmar la hipótesis establecida puesto que al implementar un proceso combinado a partir de la degradación fotocatalítica en presencia de luz solar y la biodegradación por medio de consorcios microbianos, favorece la degradación del colorante azul de metileno en aguas residuales textiles.
- Los resultados demuestran que el proceso de fotocatálisis heterogénea con el catalizador SiO_2 -Erionita, inicia el proceso de transformación del colorante azul de metileno favoreciendo que después los residuos de este proceso sean más fácilmente atacados por las bacterias favoreciendo el proceso de biorremediación.
- El catalizador SiO_2 -Erionita (75%-25%) se sintetizó por el método sol-gel se y obtuvo una gran capacidad catalítica durante la etapa de fotodegradación para reducir el colorante azul de metileno por medio del método sol-gel lo que demuestra que este método tiene una gran capacidad para formar semiconductores de alto nivel catalítico.
- La composición química elemental que se realizó para el catalizador SiO_2 -Erionita dio como resultado que este mismo no contenía impurezas.
- Para las pruebas de fotocatálisis con el catalizador SiO_2 -Erionita se obtuvieron resultados donde se pudo observar que para la muestra del blanco en presencia de luz solar y sin el catalizador, el mayor porcentaje de degradación fue de 39.28 % después de las 6 horas de exposición.
- Mientras que para la muestra del azul de metileno en presencia del catalizador SiO_2 -Erionita se obtuvo un 48.56% de degradación del colorante después de las 6 horas de exposición con una diferencia del 10% en comparación de la degradación del blanco y aunque se pudo haber obtenido por arriba de lo que se degrado a las 4 horas ya que se presentó una evaporación de la solución acuosa afectando la concentración, sin embargo, se observó que la muestra se desvaneció considerablemente en λ=610 nm puesto ya que se encuentra por debajo de los demás espectros.

- Los sistemas que logran un mayor porcentaje de biodegradación del 58.01% son la combinación del catalizador SiO_2 -Erionita con el consorcio C2 formado por las bacterias *Serratia K120, Pseudomona B03 y Pseudomona putida B44. Se sabe que*

al menos las bacterias Pseudomonas pueden degradar colorantes través de una mineralización aeróbica.

- Estos procesos fotocatálisis-microbiológico pueden ser usados como procesos biotecnológicos en la biotransformación del colorante azul de metileno, ya que presentan un efecto sinérgico comparado con el uso individual de cada uno.

BIBLIOGRAFÍA

Abraham, T. E., Senan, R. C., Shaffiqu, T. S., Roy, J. J., Poulose, T. P., & Thomas, P. P. (2008). Bioremediation of Textile Azo Dyes by an Aerobic Bacterial Consortium Using a Rotating Biological Contactor. *Biotechnology Progress*, *19*(4), 1372–1376. https://doi.org/10.1021/bp034062f

Aguedach, A., Brosillon, S., Morvan, J., & Lhadi, E. K. (2005). Photocatalytic degradation of azo-dyes reactive black 5 and reactive yellow 145 in water over a newly deposited titanium dioxide. *Applied Catalysis B: Environmental,* 57(1), 55–62. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.10.009

Ahmad, A., Mohd-Setapar, S. H., Chuong, C. S., Khatoon, A., Wani, W. A., Kumar, R., & Rafatullah, M. (2015). Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater. *RSC Advances*, *5*(39), 30801–30818. https://doi.org/10.1039/c4ra16959j

Albis Arrieta, A. R., López Rangel, A. J., & Romero Castilla, M. C. (2017). Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (Manihot esculenta) modified with phosphoric acid // Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada con ácido fosfórico. *Prospectiva*, *15*(2), 60–73. https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.777

Aly, H. F., & Abd-Elhamid, A. I. (2018). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye Using Silica Oxide Nanoparticles as a Catalyst. *Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation*, *90*(9), 807–817. https://doi.org/10.2175/106143017X15131012187953

Arica, M. Y., & Bayramoğlu, G. (2007). Biosorption of Reactive Red-120 dye from aqueous solution by native and modified fungus biomass preparations of Lentinus sajor-caju. *Journal of hazardous materials*, *149*(2), 499–507. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.021

Andreozzi, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, *53*(1), 51–59. https://doi.org/10.1016/s0920-5861(99)00102-9

Ávila, C. R. (2011*). Remoción de azul de metileno en agua empleando bagazo de agave salmiana como biosorbente.* (Maestría En Ciencias Ambientales), Universidad

Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. Recuperado de: http://ninive.uaslp.mx/jspui/bitstream/i/3566/1/TESIS%20Cintia%20Romina%20Avila.pdf

Ayed, L., Khelifi, E., Jannet, H. B., Miladi, H., Cheref, A., Achour, S., & Bakhrouf, A. (2010). Response surface methodology for decolorization of azo dye Methyl Orange by bacterial consortium: Produced enzymes and metabolites characterization. *Chemical Engineering Journal*, *165*(1), 200–208. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.018

Ayed, L., Ladhari, N., El Mzoughi, R., & Chaieb, K. (2021). Decolorization and phytotoxicity reduction of reactive blue 40 dye in real textile wastewater by active consortium: Anaerobic/aerobic algal-bacterial-probiotic bioreactor. *Journal of Microbiological Methods*, *181*, 106129. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2020.106129

Azizi, A., Alavi Moghaddam, M. R., Maknoon, R., & Kowsari, E. (2015). Comparison of three combined sequencing batch reactor followed by enhanced Fenton process for an azo dye degradation: Bio-decolorization kinetics study. *Journal of hazardous materials*, *299*, 343–350. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.044

Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L. F., & Agudelo, E. A. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. *Dyna*, *82*(191), 118–126. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49639089015

Barrera-Andrade, J. M., Orozco-Cerros, S. L., Valverde-Aguilar, G., García-Macedo, J. A., Ríos-Enríquez, M. Á., & Durán-de-Bazúa, M. del C. (2011). Evaluación de la degradación de un colorante textil usando el fotocatalizadores Fe/TiO2/SiO2 (0.0, 0.5, 0.7, 1.0 % en masa Fe) y en presencia de H2O2. *Tecnología, Ciencia, Educación*, *26*(1), 14–19. https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=48219771003

Bazin, I., Ibn Hadj Hassine, A., Haj Hamouda, Y., Mnif, W., Bartegi, A., Lopez-Ferber, M., De Waard, M., & Gonzalez, C. (2012). Estrogenic and anti-estrogenic activity of 23 commercial textile dyes. *Ecotoxicology and environmental safety*, *85*, 131–136. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.08.003

Benatti, C. T., Tavares, C. R., & Guedes, T. A. (2006). Optimization of Fenton's oxidation of chemical laboratory wastewaters using the response surface methodology. *Journal*

of environmental management, *80*(1), 66–74. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.08.014

Benkhaya, S., M' rabet, S., & El Harfi, A. (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, *115*, 107891. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891

Benkhaya, S., & EL harf, A. (2017). Design Of A New Layered Composite Membrane Based On A Physical Copolymer (PSU / PEI / PPc) Supported By A Tri-Component Support (PA6 / Fiberglass / PA6). Application of Ultrafiltration Baths Based On Azoic and Antraquinonique Dyes. *Moroccan Journal of Chemistry, 5*(1), Mor. J. Chem. 5 N°1 (2017) 1-15. doi:https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v5i1.5214

Bes Monge, S., Torres-Pinto, A., Ribeiro, R.S., Silva, A.M.T. and Bengoa, C. (2018). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. [online] Available at: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf.

Bolong, N., Ismail, A. F., Salim, M. R., & Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, *239*(1-3), 229-246. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020.

Bojalil Carrillo, J., Hernández Flores, M. F., & Segura López, L. R. (2021). Tecnologías microbianas de remoción de colorantes azoicos en la industria textil. *RD-ICUAP*, *7*(20), 186-201. http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/608

Borja, J. M., & Rojas, B. S. (2020). Nanomateriales: métodos de síntesis. *Polo Del Conocimiento*, *5*(48). Dialnet. https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1597

Braslavsky, S. E. (2007). Glossary of terms used in photochemistry, 3rd edition (IUPAC Recommendations 2006). *Pure and Applied Chemistry*, *79*(3), 293–465. https://doi.org/10.1351/pac200779030293

Broadbent, A. D. (2001). *Basic principles of textile coloration*. Society Of Dyers And Colourists, West Yorkshhire, England.

Butler, E., Hung, Y.-T., Ahmad, M. A., & Fu, Y.-P. (2016). Treatment and Management of Industrial Dye Wastewater for Water Resources Protection. *Natural Resources and Control Processes*, 187–232. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26800-2_4

Canli, M., Abali, Y., Bayca, S. U. (2013). Removal of methylene blue by natural and Ca and K-exchanged zeolite treated with hydrogen peroxide. *Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49*(2), 481-496. https://doi.org/10.5277/ppmp130210

Carlos, J. (2006). *Water in Mexico = El agua en México*. Comisión Nacional Del Agua. http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EL-AGUA-EN-MEXICO.pdf

Carneiro, P. A., Umbuzeiro, G. A., Oliveira, D. P., & Zanoni, M. V. B. (2010). Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. *Journal of Hazardous Materials*, *174*(1-3), 694–699. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.106

Carvajal Muñoz, J. S. (2011). Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales. *Producción + Limpia*, *6*(2). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552011000200009

Carrera, E. (2016). *Los retos sostenibilistas del sector textil*. https://core.ac.uk/download/pdf/81583005.pdf

Cirelli, A. F. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, *11*(3), 147–170. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002

Cerro Lloria, S. (2012). *Fotocatalizadores sílice-titania modificados con fotosensibilizadores* (pp. 8–9) [Pdf]. https://www.tdx.cat/handle/10803/669181#page=1

Chakraborty, J. N. (2010). Dyeing with sulphur dye. *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, 43–56. https://doi.org/10.1533/9780857092823.45

Chandanshive, V. V., Kadam, S. K., Khandare, R. V., Kurade, M. B., Jeon, B.-H., Jadhav, J. P., & Govindwar, S. P. (2018). In situ phytoremediation of dyes from textile wastewater using garden ornamental plants, effect on soil quality and plant growth. *Chemosphere*, *210*, 968–976. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.064

Che Noraini, C. H., Morad, N., Norli, I., Teng, T. T., & Ogugbue, C. J. (2012). Methylene Blue Degradation by Sphingomonas paucimobilis under Aerobic Conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*, *223*(8), 5131–5142. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1264-8

Chequer, F. M., Angeli, J. P., Ferraz, E. R., Tsuboy, M. S., Marcarini, J. C., Mantovani, M. S., & de Oliveira, D. P. (2009). The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutation research*, *676*(1-2), 83–86. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004

Chica Martínez, O.Y., Galvis Caballero, N.F. and Madrid Acevedo, J. (2007). *RECOPILACIÓN DE EXPERIENCIAS CON FOTO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS* [online] Available at: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021320/04Anexo.pdf

Chiva Vicent, S., Berlanga Clavijo, J. G., Martínez CuencaR., & Climent, J. (2017). *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua*. Universitat Jaume I. http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/168282

Christie, R. (2014). *Colour chemistry*. Royal society of chemistry.

Chu, H. C., & Chen, K. M. (2002). Reuse of activated sludge biomass: I. Removal of basic dyes from wastewater by biomass. *Process Biochemistry*, *37*(6), 595–600. https://doi.org/10.1016/s0032-9592(01)00234-5

Clemente, J. P. (2008). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis solar) ara tratamiento y reutilización de efluentes textiles* [Pdf]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2241/tesisUPV2816.pdf

Comisión Nacional del Agua (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DISEÑO DE PLANTAS POTABILIZADORAS TIPO DE TECNOLOGÍA SIMPLIFICADA Diciembre de 2007 www.cna.gob.mx*. [online] Available at: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf

CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

Cónsul, J., Baibich, I. M., Benvenutti, E. V., & Thiele, D. (2005). Evidence of aluminum oxide monolayer formation on a silica gel surface using grafting reactions. *Química Nova*, *28*(3), 393-396. https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000300005.

Contreras, M., Grande-Tovar, C. D., Vallejo, W., & Chaves-López, C. (2019). Bio-Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Galactomyces geotrichum KL20A. *Water*, *11*(2), 282. https://doi.org/10.3390/w11020282

Copaciu, F., Opriş, O., Coman, V., Ristoiu, D., Niinemets, Ü., & Copolovici, L. (2013). Diffuse Water Pollution by Anthraquinone and Azo Dyes in Environment Importantly Alters Foliage Volatiles, Carotenoids and Physiology in Wheat (Triticum aestivum). *Water, Air, & Soil Pollution*, *224*(3). https://doi.org/10.1007/s11270-013-1478-4

Cortazar-Martínez, A., González-Ramírez, C. A., Coronel-Olivares, C., Escalante-Lozada, J. A., Castro-Rosas, J., & Villagómez-Ibarra, J. R. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad Y Ciencia*, *28*(2), 187–199. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000200009

Cuevas Aragón, D. F. (2009). Tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes utilizados en la industria textil, mediante un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico. *Repositorio.imta.mx*. http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/365

Curi, A., Granda, W. J. V., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Información Tecnológica*, *17*(6). https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600017

de Jong, K. P. (Ed.). (2009). Synthesis of solid catalysts. *John Wiley & Sons*. https://doi.org/10.1002/9783527626854

De La Cruz Quiroga, J. (2020). *SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MATRIZ HÍBRIDA DE SIO2-PMMA DOPADA CON IONES DE TERBIO*. [Pdf] Available at: https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/12371/20210129085728-4243-T.pdf?sequence=2.

Denchak, M. (2018). *Water Pollution: Everything You Need to Know*. NRDC; https://www.nrdc.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know

Duman, O., Tunç, S., & Gürkan Polat, T. (2015). Adsorptive removal of triarylmethane dye (Basic Red 9) from aqueous solution by sepiolite as effective and low-cost adsorbent. *Microporous and Mesoporous Materials*, *210*, 176–184. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.02.040

Durán-Álvarez, Juan Carlos, Avella, Edwin, & Zanella, Rodolfo. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, *8*(14), 17-39. Epub 28 de mayo de 2021.https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52510

El Bouraie, M., & El Din, W. S. (2016). Biodegradation of Reactive Black 5 by Aeromonas hydrophila strain isolated from dye-contaminated textile wastewater. *Sustainable Environment Research*, *26*(5), 209–216. https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.014

Eren, Z. (2012). Ultrasound as a basic and auxiliary process for dye remediation: A review. *Journal of Environmental Management, 104,* 127–141.https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.028

Fisli, A., Ridwan, Krisyuningsih, Y., & Gunlazuardi, J. (2017). Preparation and characterization of $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$ composite for methylene blue removal in water. *International Journal of Technology*, *8*(1), 76-84. https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i1.2888

Foguel, M. V., Ton, X.-A., Zanoni, M. V. B., Sotomayor, M. D. P. T., Haupt, K., & Tse Sum Bui, B. (2015). A molecularly imprinted polymer-based evanescent wave fiber optic sensor for the detection of basic red 9 dye. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *218*, 222–228. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.05.007

Franciscon, E., Mendonça, D., Seber, S., Morales, D. A., Zocolo, G. J., Zanoni, M. B., Grossman, M. J., Durrant, L. R., Freeman, H. S., & Umbuzeiro, G. A. (2015). Potential of a bacterial consortium to degrade azo dye Disperse Red 1 in a pilot scale anaerobic–aerobic reactor. Process Biochemistry, 50(5), 816–825. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.01.022

Garcés Giraldo, L. F., Hernández Ángel, M. L., Peñuela Mesa, G. A., Rodríguez Restrepo, A., & Salazar Palacio, J. A. (2005). Degradación de aguas residuales de la industria

textil por medio de fotocatálisis. *Revista Lasallista de Investigación*, *2*(1), 15–18. https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=69520103

Garzon, R. (2018). Clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequiliana Webber var azul. Obtenido de http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis217.pdf

Garduño Urbina, C. (2019). *Remoción del colorante Azul de Metileno empleando residuos de té verde* [Pdf]. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104539/UAEM-FaPUR-TESIS-Carolina%20Gardu%C3%B1o%20Urbina.pdf?sequence=1

Girald, L. F. G., Franco, E. A. M., & Mesa, G. A. P. (2005). Cinética de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto por medio de la fotocatálisis con luz solar. *Revista Lasallista de Investigación*, *2*(1), 19–26. https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=69520104

González-Gutiérrez, L. V., González-Alatorre, G., & Escamilla-Silva, E. M. (2008). Proposed pathways for the reduction of a reactive azo dye in an anaerobic fixed bed reactor. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *25*(3), 415–426. https://doi.org/10.1007/s11274-008-9906-0

Gürses, A., Açıkyıldız, M., Güneş, K., & Gürses, M. S. (2016). Classification of Dye and Pigments. *SpringerBriefs in Molecular Science*, 31–45. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7_3

Growther, L., & Meenakshi, M. (2008). Biotechnological approaches to combat textile effluents. *The Internet Journal of Microbiology*, *7*(1). http://ispub.com/IJMB/7/1/11276

Hamouda, R. A. E. F., Sorour, N. M., & Yeheia, D. S. (2016). Biodegradation of crude oil by Anabaena oryzae , Chlorella kessleri and its consortium under mixotrophic conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation, 112, 128–*134. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.001

Hancco Mamani, A.D. (2019). *Capacidad de Remoción de Fosfato en aguas Residuales Municipales tratadas, mediante filtros de Zeolita Natural (Clinoptilolita) a condiciones de Laboratorio para el tratamiento terciario de aguas Residuales Municipales,*

Juliaca 2018. [online] 1library.co. Available at: https://1library.co/article/tratamiento-aguas-residuales-bases-te%C3%B3ricas-investigaci%C3%B3n.q7679nny

Haq, I., Raj, A., & Markandeya. (2018). Biodegradation of Azure-B dye by Serratia liquefaciens and its validation by phytotoxicity, genotoxicity and cytotoxicity studies. *Chemosphere*, *196*, 58–68. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.153

Hassan, M., Zhao, Y., & Xie, B. (2016). Employing TiO2 photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. *Chemical Engineering Journal, 285*, 264–275. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.093

Hassan, M. M., & Carr, C. M. (2018). A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere*, *209*, 201–219. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043

Hassan, S. S. M., Awwad, N. S., & Aboterika, A. H. A. (2009). Removal of synthetic reactive dyes from textile wastewater by sorel's cement. *Journal of Hazardous Materials*, *162*(2), 994–999. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.138

Herrmann, J. M. (2005). Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatálisis heterogénea. In *Solar safe water* (p. 161). UNSAM (Universidad Nacional de San Martín). https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/10_Capitulo_10.pdf

Hou, W., & Cronin, S. B. (2012). A Review of Surface Plasmon Resonance-Enhanced Photocatalysis. *Advanced Functional Materials*, *23*(13), 1612–1619. https://doi.org/10.1002/adfm.201202148

Humans, I. W. G. on the E. of C. R. to. (2012). Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. In *PubMed*. International Agency for Research on Cancer. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304375/

Hunger, K. (2003). *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*. Wiley-Vch.

Innocenzi, P., Zub, IU. L., & Kessler, V. G. (2008). *Sol-gel methods for materials processing*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8514-7

Jian-xiao, L. V., Ying, C., Guo-hong, X., Ling-yun, Z., & Su-fen, W. (2011). Decoloration of methylene blue simulated wastewater using a UV-H2O2 combined system. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *1*(1), 45–51. https://doi.org/10.2166/wrd.2011.019

Jimenez, G. (2009). Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias Inmovilizados sobre fibra de agave tequiliana. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.

Kandelbauer, A., & Guebitz, G. M. (2005). Bioremediation for the Decolorization of Textile Dyes — A Review. *Environmental Chemistry*, 269–288. https://doi.org/10.1007/3-540-26531-7_26

Khan, S., & Ali, J. (2018). Chemical analysis of air and water. In D. P. Häder & G. S. Erzinger (Eds.), *Bioassays* (pp. 21–39). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811861-0.00002-4

Khan, S., & Malik, A. (2018). Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye. *Environmental science and pollution research international*, *25*(5), 4446–4458. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0783-7

Lara González, L. (2017). *Fitorremediación para la extracción del colorante "azul de metileno" mediante el uso de Eichornia crassipes* [Pdf]. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/67471/UAEM-FaPUR-TESIS-Lizbeth%20Lara%20Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Llagas Chafloque, W., & Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, *9*(17), 85–96. https://doi.org/10.15381/iigeo.v9i17.699

Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, *3*(2), 275–290. https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001

López, C. Y. T. (2013). *Fotocatálisis asistida por potencial en electrodos de Ti/Ti02 nanotubular para la degradación de naranja de metilo.* [Tesis de maestría, CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C] https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/293

López, T., Dominguez, L., & García, J. (2007). Arreglo estructural de un consorcio microbiano de interés alimentario en la producción del vinagre. In *Trabajo presentado en el octavo Congreso Nacional de Microscopía, octubre, México*.

Malato, S., Fernández-Ibañez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. Catalysis Today, vol. 147, núm. 1: 108.

Mandal, T., Maity, S., Dasgupta, D., & Datta, S. (2010). Advanced oxidation process and biotreatment: Their roles in combined industrial wastewater treatment. *Desalination*, *250*(1), 87–94. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.04.012

Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A., & Rodriguez, J. (2004). *TRATAMIENTO DE RESIDUOS LIQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y TEXTIL*. Repositorio Anid. http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/164791

Mani, S., & Bharagava, R. N. (2016). Exposure to crystal violet, its toxic, genotoxic and carcinogenic effects on environment and its degradation and detoxification for environmental safety. In P. de Voogt (Ed.), Reviews of environmental contamination and toxicology (vol. 237) (pp. 71---104). Cham: Springer

Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los colorantes.* Colección Divulgación Científica y Tecnológica*.* Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254 p. http://hdl.handle.net/10872/19390

Martínez, J. R., Palomares-Sánchez, S., Ortega-Zarzosa, G., Ruiz, F., & Chumakov, Y. (2006). Rietveld refinement of amorphous SiO2 prepared via sol–gel method. Materials Letters, 60(29-30), 3526–3529. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.044

Meléndez Zambrano, N., & Navarro Ramírez, M. A. (2019). *Evaluación de la degradación de azul de metileno mediante la técnica de oxidación de aire húmedo con peróxido de hidrogeno empleando óxidos mixtos de mn, cu y/o fe como catalizador para el tratamiento de aguas residuales provenientes del laboratorio de microbiología de la pontificia universidad javeriana*. https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7394/1/6132170-2019-1-IQ.pdf

Mendoza-Hernández, J. C., Vega-Hernández, M., Silveti-Loeza, Á., Arriola-Morales, J., & Pérez-Osorio, G. (2015a). Estudio De La Estructura De Las Biopelículas De Pseudomonas Putida Mediante Microscopia De Fuerza Atómica (Afm) En Presencia De Permetrina Y Cipermetrina. *International Multilingual Journal of Contemporary Research*, *3*(2). https://doi.org/10.15640/imjcr.v3n2a12

Mendoza-Hernández, J. C., Perea-Vélez, Y. S., Arriola-Morales, J., Martínez-Simón, S. M., & Pérez-Osorio, G. (2016b). Assessing the effects of heavy metals in ACC deaminase and IAA production on plant growth-promoting bacteria. Microbiological Research, 188-189, 53–61. https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.001

Mézquita, A. (2013). Tratamiento biológico de aguas residuales a base de enzimas y bacterias.

Montaño, N. M., Sandoval Pérez, A. L., & Camargo Ricalde, S. L. (2010). Los microorganismos: pequeños gigantes. *Ciencia Y Cultura*, *17*(77), 15–23. redalyc. https://www.researchgate.net/publication/41619841_Los_microorganismos_pequenos_gigantes

Mortazavi-Derazkola, S., Salavati-Niasari, M., Amiri, O., & Abbasi, A. (2017). Fabrication and characterization of Fe 3 O 4 @SiO 2 @TiO 2 @Ho nanostructures as a novel and highly efficient photocatalyst for degradation of organic pollution. *Journal of Energy Chemistry*, *26*(1), 17–23. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2016.10.015

Moreno, A., Figueroa, D., & Hormaza, A. (2012). Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Scielo*, *7*(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100002

Mishra, S., & Maiti, A. (2018). The efficacy of bacterial species to decolourise reactive azo, anthroquinone and triphenylmethane dyes from wastewater: a review. *Environmental science and pollution research international*, *25*(9), 8286–8314. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1273-2

Mishra, S., Mohanty, P., & Maiti, A. (2019). Bacterial mediated bio-decolourization of wastewater containing mixed reactive dyes using jack-fruit seed as co-substrate: Process optimization. *Journal of Cleaner Production*, *235*(2). https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US202000033639

Musić, S., Filipović-Vinceković, N., & Sekovanić, L. (2011). Precipitation of amorphous SiO2 particles and their properties. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *28*(1), 89–94. https://doi.org/10.1590/s0104-66322011000100011

Nandanwar, R., Singh, P., & Haque, F.Z. (2015). Synthesis and Characterization of SiO2 Nanoparticles by Sol-Gel Process and Its Degradation of Methylene Blue. *American Chemical Science Journal, 5*, 1-10.

Najme, R., Hussain, S., Maqbool, Z., Imran, M., Mahmood, F., Manzoor, H., Yasmeen, T., & Shahzad, T. (2015). Biodecolorization of Reactive Yellow-2 by *Serratia* sp. RN34 Isolated from Textile Wastewater. *Water Environment Research*, *87*(12), 2065–2075. https://doi.org/10.2175/106143015x14362865226031

Ndolomingo, M. J., & Meijboom, R. (2015). Kinetic analysis of catalytic oxidation of methylene blue over γ-Al2O3 supported copper nanoparticles. *Applied Catalysis A: General, 506*, 33–43. https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2015.08.036

Noyola, A., Morgan Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf

Ochoa Carreño, D. C., & Montoya Restrepo, A. (2010). CONSORCIOS MICROBIANOS: UNA METÁFORA BIOLÓGICA APLICADA A LA ASOCIATIVIDAD EMPRESARIAL EN CADENAS PRODUCTIVAS AGROPECUARIAS. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación Y Reflexión*, *18*(2), 55–74. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-68052010000200004

Ong, S.-T., Keng, P.-S., Lee, W.-N., Ha, S.-T., & Hung, Y.-T. (2011). Dye Waste Treatment. *Water*, *3*(1), 157–176. https://doi.org/10.3390/w3010157

PACHECO VÁZQUEZ, M. (2018). *REMEDIACIÓN AMBIENTAL: UNA ALTERNATIVA PARA DEGRADAR EL COLORANTE AZUL DE METILENO POR THYMUS VULGARIS Y α-DIIMINA* [Pdf]. https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/7826/652418T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Palacio Santos, L. A. (2004). Métodos de síntesis de nuevos materiales basados en metales de transición. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, *32*, 51–61. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003205

Pepling M, Howard PH, Durkin PR (1997) use and assessment of marker dyes used with herbicides, Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS). A report available from http://www.fs.fed.us/foresthealth/pesticide/pdfs/091602_markerdyes.pdf

Peiró, A. (2003). *Nuevas aportaciones al desarrollo de metodologías en química verde: eliminación fotocatalítica de contaminantes fenólicos y preparación de fotocatalizadores mediante procesos químicos suaves*. [Tesis de doctorado, Universitat Autónoma de Barcelona]. TDX.

Pereira, L., & Alves, M. (2011). Dyes—Environmental Impact and Remediation. *Environmental Protection Strategies for Sustainable Development*, 111–162. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2_4

Primo, A., Corma, A., & García, H. (2011). Titania supported gold nanoparticles as photocatalyst. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, *13*(3), 886–910. https://doi.org/10.1039/c0cp00917b

Rawat, D., Mishra, V., & Sharma, R. S. (2016). Detoxification of azo dyes in the context of environmental processes. *Chemosphere*, *155*, 591–605. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.068

Rodríguez de Jorge, L. (2020). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes*. iAgua. https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes

Rodríguez Peña, M., Barrera Díaz, C. E., Costillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., Montero Guadarrama, I., Molina Mendieta, M., Roa Morales, G., Barrera González, H., Prato Gacia, D., Vásquez Medrano, R., Vedrenne, M., Mendoza Zepeda, A., Hurtado Alva, L., Natividad Rangel, R., Solís Casados, D. A., Escobar Alarcón, L., & González Zavala, F. (2020). Procesos de Oxidación avanzada en el tratamiento de agua. In *ri.uaemex.mx* (1st ed.). Universidad Autónoma del Estado de México. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109361

Rojas, J., & Hormaza, A. (2016). EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZUL BRILLANTE UTILIZANDO HONGOS DE LA PODREDUMBRE

BLANCA Y SUS CONSORCIOS. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *19*(1), 179–187. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000100021

Ros Moreno, A. (2011). *Métodos analíticos para contaminantes orgánicos (1/3)*. Www.mailxmail.com. http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-1-2/metodos-analiticos-contaminantes-organicos-1-3

Sahel, K., Perol, N., Dappozze, F., Bouhent, M., Derriche, Z., & Guillard, C. (2010). Photocatalytic degradation of a mixture of two anionic dyes: Procion Red MX-5B and Remazol Black 5 (RB5). Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 212(2-3), 107–112. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2010.03.019

Salazar, M. (2013). Técnicas disponibles paras el tratamiento de aguas residuales textiles. Colombia: XXI Congreso Latinoamericano de Química Textil.

Salgado-Bernal, I., Durán-Domínguez, C., Cruz-Arias, M., Carballo-Valdés, M. E., & Martínez-Sardiñas, A. (2012). Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *28*(1), 17–26. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100002

Sánchez Contreras, M.D.L.Á., González Flores, T., Ayora Talavera, T. del R., Evangelista Martínez, Z. and Pacheco López, N.A.P.L. (2017). *¿Qué son los microbios?* [online] Available at: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/68_2/PDF/QueSonMicrobios.pdf.

Sánchez Limón, G. (2020). *Degradación de agua residual textil mediante un sistema combinado de fotocatálisis-microbiológico* [Pdf]. https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/11588/11002020TL.pdf?sequence=1

Sarikaya, M., Depci, T., Aydogmus, R., Yucel, A., & Kizilkaya, N. (2016). Production of Nano Amorphous SiO2from Malatya Pyrophyllite. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science, *44*, 052004. https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052004

Saratale, R. G., Rajesh Banu, J., Shin, H.-S., Bharagava, R. N., & Saratale, G. D. (2019). Textile Industry Wastewaters as Major Sources of Environmental Contamination: Bioremediation Approaches for Its Degradation and Detoxification. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*, 135–167. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_7

Schenberg, A.C.G. (2010). Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, 24(70), pp.07-17.

SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente*. Semarnat.gob.mx. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf

Sen, S. K., Patra, P., Das, C. R., Raut, S., & Raut, S. (2019). Pilot-scale evaluation of bio-decolorization and biodegradation of reactive textile wastewater: An impact on its use in irrigation of wheat crop. *Water Resources and Industry*, *21*, 100106. https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100106

Sharma, S., Ruparelia, J. P., & Patel, M. L. (2011). A general review on Advanced Oxidation Processes for waste water treatment. Nirma University International Conference, Ahmedabad, Gujarat.

Shu Hui, T., & Ahmad Zaini, M. A. (2015). Isotherm Studies of Methylene Blue Adsorption onto Potassium Salts-Modified Textile Sludge. *Jurnal Teknologi*, *74*(7). https://doi.org/10.11113/jt.v74.4699

Silva A, S. M., Trujillo S, J., Aguilar M, L. G., & Hincapié P, M. (2009). TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS POR FOTO FENTON CON LUZ ARTIFICIAL. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *8*(15), 53–62. https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=75012333006

Singh, R., Singh, R., & Singh, P. (2014). Bacterial decolorization of textile azo dye acid orange by staphylococcus hominis RMLRT03. *Toxicology International, 21*(2), *160-166.* https://doi.org/10.4103/0971-6580.139797

Sivarajasekar, N., & Baskar, R. (2014). Adsorption of basic red 9 on activated waste Gossypium hirsutum seeds: Process modeling, analysis and optimization using

statistical design. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*(5), 2699–2709. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.058

Subashchandrabose, S. R., Ramakrishnan, B., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2011). Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria: Biotechnological potential. *Biotechnology Advances, 29(6), 896–907.* doi:10.1016/j.biotechadv.2011.07.009

Sma, P. (2015). *Sustancias contaminantes y sus efectos en la calidad del agua*. Soluciones Medioambientales y Aguas, S.A. http://www.smasa.net/sustancias-contaminantes-agua/

Terán Solíz, M. C. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas* (p. 23) [Pdf]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88273/01_TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Thimiopoulos, A., Vogiatzi, A., Simandiras, E. D., Mousdis, G. A., & Psaroudakis, N. (2018). Synthesis, characterization and theoretical studies of novel phthalocyanine complexes. *Inorganica Chimica Acta*, *412*, 121–127. https://doi.org/10.1016/j.ica.2013.11.040

Tokumoto, M. S., Pulcinelli, S. H., Santilli, C. V., & Briois, V. (2003). *Catalysis and Temperature Dependence on the Formation of ZnO Nanoparticles and of Zinc Acetate Derivatives Prepared by the Sol−Gel Route. The Journal of Physical Chemistry B, 107(2), 568–574.* https://doi.org/10.1021/jp0217381

Trifi, B., Cavadias, S., & Bellakhal, N. (2011). Decoloration of Methyl Red by gliding arc discharge. *Desalination and Water Treatment*, *25*(1-3), 65–70. https://doi.org/10.5004/dwt.2011.1442

Tulinski, M., & Jurczyk, M. (2017). Nanomaterials Synthesis Methods. *Metrology and Standardization of Nanotechnology*, 75–98. https://doi.org/10.1002/9783527800308.ch4

Ünlü M (2008) Indigo dyeing wastewater treatment by the membrane based filtration process, Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

Valencia, R., Sanchez Alarcón, J., Ortiz, E., & Gómez, J. L. (2007). La contaminación de los ríos, otro punto de vista Primera parte. *Ciencia en la Frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, *V*(1), 35–49

Vargas, A. M. M., Paulino, A. T., & Nozaki†, J. (2009). Effects of daily nickel intake on the bio-accumulation, body weight and length in tilapia (Oreochromis niloticus). *Toxicological & Environmental Chemistry*, *91*(4), 751–759. https://doi.org/10.1080/02772240802541353

Waghmode, T. R., Kurade, M. B., Sapkal, R. T., Bhosale, C. H., Jeon, B.-H., & Govindwar, S. P. (2019). Sequential photocatalysis and biological treatment for the enhanced degradation of the persistent azo dye methyl red. *Journal of Hazardous Materials*, *371*, 115–122. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.004

Wu, C.-H., Chang, C.-L., & Kuo, C.-Y. (2008). *Decolorization of Procion Red MX-5B in electrocoagulation (EC), UV/TiO2 and ozone-related systems. Dyes and Pigments, 76*(1), 187–194. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.08.017

Wu, J., Li, Q., Li, W., Li, Y., Wang, G., Li, A., & Li, H. (2020). Efficient removal of acid dyes using permanent magnetic resin and its preliminary investigation for advanced treatment of dyeing effluents. *Journal of Cleaner Production*, *251*, 119694. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119694

Yuliati, L., Hattori, T., & Yoshida, H. (2005). Highly dispersed magnesium oxide species on silica as photoactive sites for photoinduced direct methane coupling and photoluminescence. *Physical chemistry chemical physics: PCCP*, *7*(1), 195–201. https://doi.org/10.1039/b410089a

Zanella, R. (2014). Aplicación de los nanomateriales en catálisis. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, *7*(12), 66–82. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912014000100066&script=sci_arttext

Zhang, Q., Chen, C., Wang, M., Cai, J., Xu, J., & Xia, C. (2011). Facile preparation of highly-dispersed cobalt-silicon mixed oxide nanosphere and its catalytic application in cyclohexane selective oxidation. *Nanoscale research letters*, *6*(1), 586. https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-586

Zhou, X., Liu, G., Yu, J., & Fan, W. (2012). Surface plasmon resonance-mediated photocatalysis by noble metal-based composites under visible light. *Journal of Materials Chemistry*, *22*(40), 21337. https://doi.org/10.1039/c2jm31902k