



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Degradación de agua residual textil mediante un sistema
combinado de fotocatalisis-microbiológico**

TESIS PROFESIONAL

**Que para obtener el Título de:
Licenciatura en Ingeniería Ambiental**

Presenta:

Gabriela Sánchez Limón

Director de Tesis:

Dr. José Carlos Mendoza Hernández

Co-director:

Dra. Maribel Castillo Morales

Puebla, Pue. 2020

i. Tabla de contenido

ii.	Índice de tablas.....	iii
iii.	Índice de figuras.....	iii
1.	Introducción.....	1
2.	Planteamiento del problema.....	2
3.	Justificación.....	3
4.	Objetivos.....	4
4.1	Objetivo general.....	4
4.2	Objetivos específicos.....	4
5.	Marco Teórico.....	4
5.1	Calidad del agua.....	4
5.2	Tratamiento de aguas en México.....	6
5.3	Agua en la industria textil.....	9
5.3.1	Colorantes empleados en la industria textil.....	10
5.3.2	Contaminación del agua por la industria textil.....	14
5.4	Tecnologías de remoción de colorantes.....	16
5.5	Fotocatálisis heterogénea.....	18
5.6	Biodegradación por medio de consorcios bacterianos.....	19
5.7	Espectrofotometría de UV-Vis para cuantificar la degradación.....	20
6.	Marco metodológico.....	21
6.1	Materiales y equipo.....	21
6.2	Pruebas preliminares.....	24
6.2.1	Fotocatálisis.....	24
6.2.2	Microbiológico.....	24
6.3	Pruebas finales.....	30
7.	Resultados.....	33
7.1	Pruebas preliminares.....	33
7.1.1	Fotocatálisis.....	33
7.1.2	Fotocatálisis - Microorganismos.....	34
7.2	Pruebas finales de degradación con foto catalizadores y consorcios seleccionados.....	44
8.	Discusión de resultados.....	45
8.1	Fotocatalisis.....	45
Microbiológico.....		46

9. Conclusión	¡Error! Marcador no definido.
10. Bibliografía	49

ii. Índice de tablas

Tabla 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales industriales (2017)	8
Tabla 2. Usos consuntivos, según el tipo de fuente de extracción (2017)	9
Tabla 3. Ejemplos de grupos Cromóforos y Auxócromos	11
Tabla 4. Clasificación tintorea de los colorantes	12
Tabla 5. Ventajas y desventajas de algunos métodos de remoción de colorantes	17
Tabla 6. Catalizadores empleados para fotocátalisis Catalizadores empleados para la fotocátalisis heterogénea	22
Tabla 7. Composición química elemental-EDS	22
Tabla 8. Bacterias empleadas para la biodegradación.....	23
Tabla 9 Conformación de consorcios bacterianos.....	26
Tabla 10. Nomenclatura para la identificación de catalizadores y consorcios	27
Tabla 11. Catalizadores y consorcios seleccionados para pruebas finales	30

iii. Índice de figuras

Figura 1. Diferenciación entre un grupo cromóforo y auxocromo	11
Figura 2. Degradación de agua residual por bacteria B03 (<i>Pseudomonas putida</i>)	25
Figura 3. Degradación de agua residual por bacteria B44 (<i>Pseudomonas putida</i>)	25
Figura 4. Degradación de agua residual por bacteria K120 (<i>Serratia</i>).....	25
Figura 5. Degradación de agua residual por bacteria K131 (<i>Enterobacter</i>).....	25
Figura 6. Degradación de agua residual por bacteria MC188 (<i>Enterobacter</i>)	25
Figura 7. Degradación de agua residual por bacteria N9 (<i>Enterobacter</i>).....	25
Figura 8. Degradación de agua residual por bacteria N16 (<i>Enterobacter</i>).....	25

Figura 9. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{SiO}_2/\text{Erionita}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	28
Figura 10. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{SiO}_2/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	28
Figura 11. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	28
Figura 12. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	28
Figura 13. Biodegradación del residuo de fotocatalisis SiO_2 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	28
Figura 14. Biodegradación del residuo de fotocatalisis Al_2O_3 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	29
Figura 15. Biodegradación del residuo de fotocatalisis Erionita por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	29
Figura 16. Biodegradación del residuo de fotocatalisis z17 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	29
Figura 17. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	29
Figura 18. Biodegradación del residuo de fotocatalisis blanco por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).	29
Figura 19. Fotocatalisis. Ensayo final.	!Error! Marcador no definido.
Figura 20. Pruebas finales. Biodegradación de los consorcios 2 (a) y 4(b) después de 3 días de haberlos adicionado en los residuos de fotocatalisis.....	32
Figura 21. Degradación de agua residual textil por medio de fotocatalisis.....	33
Figura 22. Biodegradación del residuo de fotocatalisis usando el catalizador $\text{SiO}_2/\text{Erionita}$ con consorcios bacterianos.....	34
Figura 23. Biodegradación del residuo de fotocatalisis usando el catalizador $\text{SiO}_2/\text{Z17}$ con consorcios bacterianos.....	35
Figura 24. Biodegradación del residuo de fotocatalisis usando el catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ con consorcios bacterianos.....	36
Figura 25. Biodegradación del residuo de fotocatalisis usando el catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ con consorcios bacterianos.....	37
Figura 26. Biodegradación del residuo de fotocatalisis usando el catalizador SiO_2 con consorcios bacterianos.	38

<i>Figura 27. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Al₂O₃ con consorcios bacterianos.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 28. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador erionita con consorcios bacterianos.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 29. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Z17 con consorcios bacterianos</i>	<i>41</i>
<i>Figura 30. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Al₂O₃/Zn con consorcios bacterianos.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31. Biodegradación del blanco de fotocátalisis con consorcios bacterianos</i>	<i>43</i>
<i>Figura 32. Degradación de agua residual (muestra 2) por el conjunto catalizador Al₂O₃ -consorcio 2</i>	<i>44</i>
<i>Figura 33. Degradación de agua residual (muestra 2) por el conjunto catalizador Al₂O₃ -consorcio 4</i>	<i>45</i>

1. Introducción

Una de las principales causas de contaminación del agua es el vertido de aguas residuales en bienes nacionales, provenientes de industrias que descargan sus efluentes sin tratar o sin un tratamiento adecuado, las cuales contienen una alta carga contaminante fruto del amplio uso de productos químicos en los procesos de fabricación. De entre estas industrias uno de los giros que más contamina los cuerpos de agua es la industria textil, puesto que utiliza extraordinarias cantidades de agua en la manufacturación de tejidos y además se encuentra entre las industrias que emplea mayor cantidad de sustancias químicas en forma de colorantes.

Los colorantes son una clase de compuestos orgánicos, en la industria textil son usados en los procesos de teñido e impresión, se estima que existen 10,000 tipos de colorantes, su origen puede ser natural o artificial con una estructura química muy variable. El principal problema con este tipo de compuestos es que tiñen el agua y generan variaciones enormes en parámetros como DBO₅, DQO, sales disueltas, Sólidos Totales Disueltos STD, sólidos suspendidos totales SST pH, entre otros criterios que al excederse afectan la calidad del agua y en consecuencia también la vida acuática. Aunque la mayoría de este tipo de compuestos no es dañino, algunos de estos colorantes poseen propiedades tóxicas y carcinogénicas ocasionando que la salud de la población en general se encuentra en riesgo.

La contaminación de los cuerpos de agua y el impacto ambiental que genera la descarga de una vasta cantidad de sustancias químicas y colorantes usados en la industria ha promovido el estudio de nuevas tecnologías emergentes basadas en procesos de degradación y eliminación de colorantes, por medio de adsorción, oxidación, filtración, uso de bacterias, enzimas, entre otros. De entre este grupo de tecnologías la fotocatalisis es una de las más destacadas, considerando que una de sus ventajas es no ser selectiva, lo cual, permite degradar un abundante número de compuestos contaminantes o una mezcla de ellos provenientes de diversas fuentes. La fotocatalisis requiere de luz para aminorar las sustancias xenobióticas, una buena fuente de energía es la luz solar que es fácil de captar y no tiene costo, aunque, una posible contrariedad de esta técnica es la incidencia del sol que es desigual a lo largo del año por lo que puede provocar una baja eficiencia en esta técnica, no obstante, el uso de otro método que lo complementaría mejoraría el rendimiento del proceso, uno de estos es el uso de microorganismo, gracias a que existen millones de bacterias en el ambiente y en medios con condiciones extremas es posible encontrar especies capaces de degradar colorantes

textiles de distintas procedencias y toxicidad, esto se lograría al establecer las condiciones adecuadas para las bacterias.

La combinación de uno o más métodos que se complemente hace posible optimizar la eliminación de sustancias recalcitrantes y los tiempos de remoción de colorantes en aguas residuales. Un tratamiento biológico en el que se empleen microorganismos como consorcios bacterianos podría mejorar aún más la eliminación de las sustancias químicas después de un tratamiento por fotocátalisis.

Hasta ahora pocos estudios han demostrado la eficacia de la combinación de dos o más métodos en donde los microorganismos se vean involucrados en la remoción de colorantes en las aguas contaminadas, es por ello que en este trabajo se someterá a prueba la degradación de agua residual textil mediante un sistema combinado Fotocátalisis-Microbiológico.

2. Planteamiento del problema

El tratamiento de aguas residuales es un tema que ha ido tomando mayor importancia en México, esto es resultado de la escases que ha presentado este vital líquido en las últimas décadas en ciertas entidades del país, se sabe que “la disponibilidad natural media per cápita ha disminuido de 17,742 m³/hab/año en 1950, a tan sólo 4,250 m³/hab/año en 2010 y será de 3,800 m³/hab/año en 2025” (Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2012). Sin embargo, se ha observado que aunque se tenga la cantidad prevista o necesaria de agua en ocasiones no cuenta con los parámetros de calidad requeridos para realizar las distintas actividades humanas auspiciado por la contaminación de los cuerpos de agua ocasionada por diversas sustancias tales como metales pesados, sólidos disueltos, grasas, aceites, compuestos orgánicos persistentes, colorantes, entre otras sustancias químicas.

La contaminación de los acuíferos en el país en su mayor parte se debe al vertido de las aguas residuales industriales. Puesto que al realizar sus procesos productivos las fabricas emplean enormes cantidades de sustancia químicas entre las que se encuentran elementos con características nocivas, por lo que el tratamiento de las aguas residuales debe ser específico a los tipos de compuestos que se encuentran en sus efluentes lo cual hace complejo y costoso el tratamiento, razón por la que ciertas empresas realizan sus descargas sin tratar.

México es uno de los principales productores de mezclilla a nivel mundial. Por lo tanto, es un país importante para la fabricación textil. Siendo México un país en desarrollo particularmente susceptible a los efectos del cambio climático, con muchas desigualdades, con regulaciones y

cumplimiento inadecuados, los recursos de agua en este país son particularmente vulnerables (Greenpeace, 2012).

Las descargas de agua residual provenientes de la industria textil contienen numerosos productos químicos utilizadas en el proceso de manufactura de tejidos, algunas de estas sustancias como los disolventes son recuperados o removidos antes de ser descargarlos, pero no todos los compuestos son fácil de remover debido a su naturaleza, algunos de ellos como los colorantes son vertidos a los cuerpos de agua perjudicando la vida acuática, la estética del paisaje y la calidad del agua, tal como lo indica Warshaw J. L. (1998).

A pesar de la existencia de numerosas publicaciones dedicadas al estudio de la degradación de colorantes la mayoría se centra en tratar de eliminar un colorante en específico de modo que al aplicarlo a un agua residual textil resulta que no es tan eficiente por el gran número de componentes que contiene el agua. Por esa razón surge la necesidad de encontrar un método que sea más eficiente al aplicarlo en un agua residuales proveniente de una industria textil, por ello se analizará un sistema combinado de fotocátalisis-microbiológico, se pondrá a prueba la degradación de colorantes inicialmente con fotocátalisis y posteriormente con microorganismos para aumentar la eliminación de esta clase de compuestos químicos orgánicos.

3. Justificación

La creciente demanda de agua a nivel mundial, la escasez y la contaminación de las fuentes de abastecimiento han requerido la búsqueda de nuevos métodos de tratamiento de aguas residuales que sean cada vez más eficientes y baratos. Con el fin de disminuir el daño a los cuerpos de agua y a la vida silvestre, cubrir la necesidad del agua a través del reúso de este vital líquido y que su consumo sea seguro es que se realiza este trabajo en el cual se acoplará dos tecnologías de remoción de colorantes y pigmentos: fotocátalisis y microorganismos.

En estudios anteriores ya se ha demostrado que la fotocátalisis es eficaz en la eliminación de contaminantes, asimismo es un método viable, dado que puede utilizar energía solar y el fotocatalizador se puede recuperar y reintroducirlo en el proceso ahorrando costos. Igualmente, la gran cantidad de microorganismos hace posible localizar las poblaciones más confiables en la biodegradación de colorantes para mineralizarlos, además este tipo de tratamiento biológico permite la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y del Carbono Orgánico Total (COT).

Al combinar estas dos tecnologías en un agua residual textil se busca optimizar los recursos económicos y la remoción de colorantes en un menor tiempo con la intención de que este sistema sea aplicado en plantas de tratamiento de industrias textiles de modo que disminuya el impacto ambiental y mejore la calidad de las aguas superficiales.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Degradar un agua residual textil mediante un sistema combinado Fotocatálisis-microbiológico.

4.2 Objetivos específicos

- Analizar la degradación del agua residual textil mediante fotocatalisis heterogénea.
- Analizar la degradación del agua residual textil mediante consorcios microbianos
- Analizar la degradación del agua residual después del tratamiento fotocatalítico mediante consorcios microbianos.

5. Marco Teórico

5.1 Calidad del agua

El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos. El agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es el vínculo crucial entre la sociedad y el medioambiente. (Naciones Unidas UN, s.f.)

Todos los seres vivos en el planeta están compuestos en gran porcentaje de agua, toda la vida en la tierra depende del agua que forma parte de los ciclos biogeoquímicos, y en el caso de los seres humanos también sirve para desarrollar las actividades sociales y económicas, sin embargo la polución de las masas de agua por parte de las actividades antropogénicas ha afectado la composición química natural del agua superficial, con esto se han visto afectados los ecosistemas acuáticos y la salud del ser humano, debido al contacto y consumo de aguas que no cumplen con los criterios de calidad.

Peters et al (como se citó en Secretaria de medio ambiente y recursos naturales SEMARNAT, 2014) indica que la calidad del agua es un atributo que mide las propiedades físicas, químicas y

biológicas del líquido. El agua naturalmente contiene sustancias disueltas, material particulado no disuelto y organismos vivos pero debido a su uso estas propiedades son alteradas en formas que pueden amenazar la integridad de los ecosistemas y la salud humana (UN, 2011). Por ello los parámetros de calidad del agua varían en función del uso que se le quiere dar, así para el agua potable los estándares a cumplir tienen que ser estrictamente altos ya que está destinado al consumo humano, de esta forma se evitan enfermedades hídricas que pudieran afectar la salud de la comunidad. Por lo general, la calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares regidas por organismos nacionales e internacionales que sirven como referencia, a partir de ello los gobiernos de cada país han instaurado políticas, normas y leyes que establecen las condiciones y parámetros con los que debe contar el agua de acuerdo a la actividad que fuera destinada. Estas normas se basan normalmente en unos niveles de toxicidad científicamente aceptables tanto para los humanos como para los organismos acuáticos (UN, 2014). En México el organismo encargado de establecer estos requisitos es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Existen 18 parámetros dedicados a determinar la calidad y contaminación en el agua, no obstante, la CONAGUA publica entre sus principales indicadores de calidad del agua, la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales SST.

La DBO_5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal. La DBO_5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica (SEMARNAT, 2010). La diferencia principal entre la DBO_5 y la DQO es que la primera mide la materia orgánica que es biodegradable, mientras que la segunda mide la cantidad de materia orgánica que es degradada por medios químicos” (CONAGUA, 2015). El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales. Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o

aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipal. (SEMARNAT, 2010).

A nivel industrial de acuerdo al giro, el agua proveniente de este tipo de efluentes puede contener una gran cantidad de sustancias contaminantes por lo que no es suficiente tomar como referencia la DQO y los SST para asegurar un tratamiento de calidad, para ello se deben abarcar un mayor número de parámetros ya que es necesario cerciorar la remoción de cualquier tipo de compuestos que pudiera ser dañino o perjudicial al medio en el cual será vertido o empleado. En lo que respecta a la industria textil, los principales parámetros de calidad que caracterizan las aguas residuales son: DBO, DQO SST, SSV, Grasas y Aceites, Cromo, fenoles, pH, color y otros metales (Moeller, Mijaylova y Escalante, 2002).

La calidad del agua nos permite tener un manejo seguro del líquido, conocer el grado de contaminación y el estado de un ecosistema acuático. Un agua con una buena calidad puede ser apta para el riego agrícola, uso industrial y recreacional pero, la baja calidad del agua afecta directamente sobre la cantidad de agua de diversas maneras. El agua contaminada que no puede utilizarse para consumo, el baño, la industria o la agricultura reduce de forma efectiva la cantidad de agua disponible en una determinada zona (UN, 2014).

5.2 Tratamiento de aguas en México

Los problemas de la calidad del agua son muy complejos por lo que demandan atención y acción global, razón por la que el tratamiento de aguas residuales en México y el mundo ha tomado mayor relevancia en últimas décadas como respuesta a problemas de escasez, el crecimiento poblacional distribución desigual del agua, las enfermedades hídricas, la expansión de las actividades industriales y agrícolas, la contaminación y el súbito daño al medio ambiente.

El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo remover, a través de operaciones unitarias, los contaminantes cuyas concentraciones no cumplan con los límites máximos permisibles establecidos en la norma aplicable. El tratamiento además de aportarle valor agregado al agua y disminuir la contaminación favorece al reusó del capital hídrico. La reutilización de las aguas residuales es fundamental en el ciclo del agua, tanto como una medida mitigadora de la contaminación de los cuerpos de agua, como por la disminución de los volúmenes de agua de primer uso, por lo que desde hace algunos años en México se promueve el reúso en actividades que así lo permitan. (CONAGUA, 2015)

A pesar de que cada año en el país se invierten millones de pesos para la creación y mantenimiento de infraestructura hidráulica esto no ha sido suficiente para garantizar la calidad y cubrir la demanda del recurso hídrico, lo cierto es que en algunas industrias y entidades del país no se cuenta con plantas de tratamiento y en la mayoría de los casos las plantas establecidas no cuentan con los recursos para un tratamiento eficiente, sin contar que en ninguna de las plantas se aplican medidas específicas para la remoción de los contaminantes emergentes tal como lo indica Merino y Velázquez (2018), solo 54% de las plantas menores a 100 litros/segundo funcionan, y solamente 25% lo hacen de manera adecuada en consecuencia, más del 50% de las plantas de tratamiento municipales en México presentan una calificación global de pésimo a mal funcionamiento. En consecuencia, la descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas (SEMARNAT, 2014).

El destino de los efluentes provenientes de las plantas de tratamiento depende del sistema de descarga. Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales y no municipales. Las municipales son generadas en los núcleos de población y colectadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, las no municipales son aquellas generadas por otros usos, como puede ser la industria autoabastecida y que se descargan directamente a cuerpos de agua nacionales (CONAGUA, 2018). La industria autoabastecida se refiere a aquellas industrias que toman el agua directamente de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país (INEGI, s.f.), de las que se extrae agua para las diversas actividades humanas de ahí la importancia de un tratamiento eficaz que garantice la calidad del agua.

La norma que regula la calidad de agua y los parámetros con los que deben cumplir las descargas de agua residual en aguas superficiales y bienes nacionales es la NOM-001-SEMARNAT-1996, pero debido a su incumplimiento la mayoría de los cuerpos de agua en México han visto alterado su composición natural, y esto es efecto del tratamiento ineficaz en ciertas plantas pero sobre todo por el vertido de las aguas residuales sin tratamiento, la insuficiencia de recursos e infraestructura en poblaciones e industrias.

La falta de coordinación entre usuarios y autoridades, aunado a la falta de un adecuado tratamiento y reúso de las aguas residuales generadas; conducen a la sobre explotación del recurso, la contaminación de ecosistemas, la degradación de los suelos y a un impacto negativo sobre la seguridad alimentaria (De la Peña, Ducci y Zamora, 2013). La realidad es que no sólo en México sino en el mundo se trata muy poca agua antes de ser vertida a los ríos, lagos y mares. Actualmente más

del 80 por ciento de las aguas residuales generadas en los países en desarrollo se descargan sin tratamiento a los cuerpos de aguas superficiales (CONAGUA, 2015).

La Comisión Nacional del Agua al 2018 contabilizó 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y 3025 plantas de aguas residuales industriales en operación, en las que se trataron 135.6 de los 215.2 m³/s recolectado y 83.7 m³/s de aguas residuales respectivamente (CONAGUA, 2018). De entre ellas las aguas residuales industriales utilizan tres tipos de tratamiento, en la tabla 1 se muestran los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales al 2017.

Tabla 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales industriales (2017)

Tipo de tratamiento	Propósito	Número de plantas	Gasto de operación (m ³ /s)	Tipo de tratamiento (%)
<i>Primario</i>	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual	967	30.08	35.9
<i>Secundario</i>	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos.	1831	49.47	59.1
<i>Terciario</i>	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintética	88	1.80	2.2
<i>No especificado</i>	No especificado	139	2.33	2.8
Total		3025	83.69	100

Fuente: CONAGUA 2018, Estadísticas del agua en México 2018.

A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo. Existen 245 mil kilómetros cuadrados de ecosistemas marinos afectados con repercusiones en la pesca, la cadena alimenticia y medios de vida. El 80 por ciento de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales y una tercera parte de las defunciones causadas por éstas se deben al uso y consumo de agua insalubre. El agua y

los alimentos contaminados se consideran como los principales vehículos involucrados en la transmisión de bacterias, virus o parásitos (CONAGUA, 2015).

A pesar de que en México se han fomentado campañas de reutilización de aguas tratadas para el riego de cultivos agrícolas, subsiste la problemática de que estos recursos hídricos no cumplen con los parámetros necesarios, México es el segundo país en el mundo, después de China, que utiliza en mayor medida agua residual cruda para este fin (Merino y Velázquez, 2018).

5.3 Agua en la industria textil

En México datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) informan que la industria autoabastecida utiliza el 4.9% del total de las aguas que se consumen en el país (ver Tabla 2), y debido a la naturaleza de los procesos productivos en los que es esta forma parte es uno de los sectores que más contamina las masas de agua consecuencia de las propiedades químicas de los insumos y bienes que se elaboran.

Tabla 2. Usos consuntivos, según el tipo de fuente de extracción (2017)

Uso	Origen superficial (miles de hm ³)	Origen Subterráneo (miles de hm ³)	Volumen total (miles de hm ³)	Extracción
Abastecimiento público	5.3	7.4	12.6	14.4
Agrícola	42.5	24.3	66.8	76.0
Energía eléctrica excluyendo hidroeléctrica	3.7	5	4.2	4.7
Industria autoabastecida	2.0	2.2	4.3	4.9
Total	53.5	34.4	87.9	100.0

Fuente: Registro Público De Derechos Del Agua (REPDa) 2017

En la industria autoabastecida existen diversos giros pero de entre estos la industria textil es una de las que más destaca en consumo del vital líquido ya que precisa grandes volúmenes de agua por kilogramo de producto, además de ser uno de los giros que acrecienta el daño al ambiente lo cual lo ha posicionado en el segundo sitio de las industrias más contaminantes solo después del petróleo.

De acuerdo a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2018) “la industria textil está valorada en trillones de dólares, aproximadamente 1.8% del PBI mundial”, esto no es sorprendente, puesto que la industria textil ha crecido en los últimos años en conjunto con el aumento de la población aunado a que el vestido es una necesidad del ser humano, la demanda de esta clase de productos se ha ido incrementando, relegando la importancia del efecto negativo que generan esta tipo de industrias. La industria textil y de la moda son importantes en la economía pero, desde una visión de la sostenibilidad, esta industria, muchas veces, opera a expensas de factores sociales y del medio ambiente. Se utilizan cantidades importantes de agua y energía (dos factores de

preocupación en el mundo), además de generar residuos, efluentes y contaminación. (Gardetti y Delgado, 2018)

Cifras de la CONAGUA informan que el agua virtual (cantidad de agua que se requiere para obtener un producto) que se destina en un 1 kg de tela de algodón es de aproximadamente 10 800 litros de agua de los cuales para el blanqueamiento de la tela se requieren aproximadamente 30 mil litros de agua por tonelada de algodón y para el teñido de la tela 140 mil litros por tonelada. Así, una playera de algodón, con un peso aproximado de 250 gramos tiene una huella hídrica de 2 700 litros. Simultáneamente, en la fabricación de mezclilla se requiere alrededor de 30 m³ de agua por toneladas para el blanqueo, 140 m³ por tonelada para el estampado (CONAGUA, 2007). Cifras que pueden varían de acuerdo al tipo de tratamiento, tejido, maquinaria, sustancias empleadas en el acabado de las telas e inclusive el tipo de colorante lo cual se puede traducir en un volumen mayor de agua.

La EPA (1996) indica que el agua es ampliamente usada en todas las operaciones de procesamiento textil. Casi todos los colorantes y productos químicos de acabado son aplicados a los tejidos en baños de agua. Más aún, muchas etapas de preparación de las telas como el blanqueado utilizan sistemas acuosos.

5.3.1 Colorantes empleados en la industria textil

Moeller y Garzón, 2003 (como se citó en Garzón, 2009) así como la ETAD (The ecological and toxicological association of dyes and organic pigment manufactures) indican que los colorantes son sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso que imparten color a una sustancia incolora, o bien, a un sustrato por medio de una absorción selectiva de luz.

El tinte de un objeto es función del sistema cromóforo y auxócromo del colorante. Las moléculas orgánicas usadas como colorantes tienen un sistema de enlaces múltiples que mediante absorción selectiva de la luz, la cual depende de la energía asociada con tales sistemas, presentan colores específicos, en la tabla 3 se muestra algunos ejemplos. Las estructuras cromóforas son las responsables del tinte o tono principal y los auxócromos intensifican o modifican el tinte (figura 1), estas últimas hacen que los colorantes sean más solubles y tengan una mayor afinidad en la superficie a colorear. Para que una sustancia sea considerada colorante, además de poseer color (o desarrollarlo a través de una reacción química) debe poder transferirlo al medio al cual se aplica. En el teñido de fibras o en la coloración de alimentos preparados o productos farmacéuticos y cosméticos alimentarios se emplean colorantes generalmente orgánicos (Marcano, 2018).

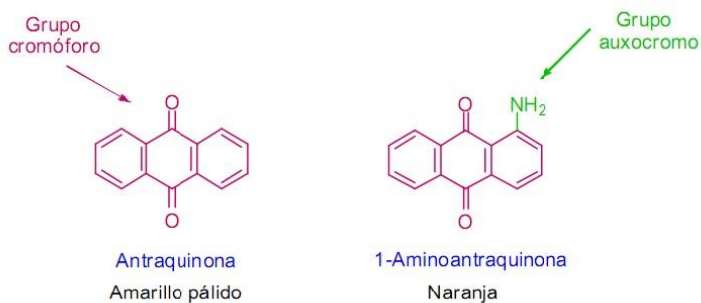


Figura 1. Diferenciación entre un grupo cromóforo y auxóchromos

Tabla 3. Ejemplos de grupos Cromóforos y Auxóchromos

Cromóforos	N=O (nitroso), O-N=O (nitro), C=S (tiocarbonilo), C=O, (carbonilo), N=N (azo), N=N-O (azoxi), C=N (ciano), C=N (imino), C=C (etinilo).
Auxóchromos:	OH (hidroxi), NHMe (metilamino), NMe2 (dimetilamino), OR (alcoxi), Cl, Br, I, (halógenos)

Es por ello que existen diversos criterios para la clasificación de los colorantes ya sea por su naturaleza, por su estructura química, los métodos de aplicación, el tipo de tejido, etc., sin embargo el Índice de Colores (Color Index- CI, publicación realizada por la Asociación Americana de químicos y Coloristas Textiles, y la Sociedad de Tinteros y Coloristas de Inglaterra) contiene una clasificación de colorantes por su aplicación y tipo de compuestos químicos, la cual es aceptada internacionalmente. Usando el criterio del CI el cual señala que los colorantes se pueden agrupar de acuerdo a su clasificación tintórea, en la tabla 4 se muestran los grupos a los cuales puede pertenecer un colorante, algunas de sus características y aplicaciones

De acuerdo a Marcano (2018) los mecanismos de transferencia y adhesión en los que se asocian las superficies y colorantes para su fijación se encuentran la formación de puentes de hidrógeno, la insolubilización, la formación de soluciones sólidas, la formación de enlaces salinos y de enlaces covalentes.

Tabla 4. Clasificación tintorea de los colorantes

Tipo de colorante	Descripción	Aplicación	Grupo químico	Método de aplicación
Directos	Aquellos que contienen grupos polares (RNH ₃ ⁺ , RSO ₃ ⁻ , etc.), son aplicables directamente en solución (solubles en agua) y se adhieren a las fibras por interacciones electrostáticas o por la formación de sales. Por costumbre se conocen como colorantes directos aquellos aniónicos que tienen especial afinidad por fibras celulósicas, en este grupo se encuentran: ácidos y básicos.	Presentan una gran afinidad por materiales de lana, algodón, rayón y otras fibras de celulosa,	Azo, poliazo, oxazina, ftalocianina, estilbeno	Al aplicar este tipo de colorantes las fibras se tiñen mediante cocción en baños con condiciones neutrales o ligeramente alcalinas adicionadas con algún electrolito.
Ácidos	Sus grupos cromóforos son aniónicos solubles en agua que contienen grupos ácidos como: SO ₃ H, CO ₂ H, NO ₂ , OH (fenólicos), se fijan por formación de sales.	Utilizados para teñir fibras proteicas (lana y seda) o poliamidas fibras sintéticas, nylon, lana y seda.	Azo, antraquinonas, azina, nitro, nitrosos, trifenilmetano, y xanteno	Se utiliza un baño de ácido débil para lana, seda o algodón. Algunos se aplican después de tratar las fibras con un mordiente de óxido metálico, ácido tánico o dicromato.
Básicos	Poseen un cromóforo que forma parte de un ión positivo (generalmente una sal de amina o un grupo imino ionizado). Los colorantes básicos para algodón también se conocen como colorantes al tanino.	Tienen afinidad por las fibras con grupos ácidos como las de lana, seda, poliéster, poliacrilonitrilo	Azo, antraquinona, oxazina, triarilmetano, azina, cianina, difenilmetano, hemicianina, tiazina, oxazina y xantano	Se utilizan agentes catiónicos-aniónicos adicionales (sales de bases orgánicas que fuerzan al grupo cromóforo a unirse al catión). Para lana, seda o algodón se utiliza un baño de ácido débil.
Dispersos	Son compuestos orgánicos no iónicos, poco solubles en agua pero solubles en solventes orgánicos y/o en fibras sintéticas no polares. Se aplican con la ayuda de agentes dispersantes. Es frecuente el uso de mezclas de colorantes para obtener un tono particular.	Poliéster y en cierta medida nylon, celulosa, acetato de celulosa, fibras de acrílico. En general se usan para teñir fibras sintéticas hidrófobas	Azo, antraquinona, nitro y grupos benzodifuranona	Se utilizan agentes de esponjamiento o portadores de naturaleza fenólica para que estos tintes actúen.

Reactivos	Engloba aquellos que poseen en su molécula un grupo reactivo que se une a la fibra mediante enlaces covalentes formando ésteres o éteres. Se preparan preferentemente haciendo reaccionar el cloruro de cianurilo con algunos colorantes de los grupos azoicos, antraquinones, ftalocianínicos, entre otros. Son sólidos a la luz y al lavado, poco resistentes al blanqueado.	Algodón, lana, seda, poliamidas y en menor medida nylon	Azo, antraquinona, triarilmetano, ftalocianina	Para algodón se utilizan en un baño caliente o frío de carbonato sódico anhidro y sal común.
VAT	También conocidos como colorantes a la tina, son sustancias insolubles, estos compuestos incoloros se utilizan para impregnar fibras de algodón, las que después son tratadas con un oxidante o se exponen al aire para desarrollar color. Al reducirlos en solución se vuelven en álcalis e incoloras, y se conocen como leucotinas que son solubles.	Algodón, poliéster, rayón, fibras de celulosa	Antraquinona incluyendo quinonas policíclicas e indigoides	Se transforman en leucomuestos con algunos oxidantes como hidróxido sódico e hidrosulfito sódico, este proceso se lleva a cabo a una temperatura de 30 a 60 °C.
Mordentes	Son solubles en agua, estos son los que se combinan con sales para formar materiales coloreados insolubles llamados lacas. Tiñen las fibras mordentadas con hidróxidos metálicos formando lacas.	Lana y seda	Azo, antraquinonas	
Sulfurados	Son colorantes poliméricos insolubles en el agua que contienen azufre tanto como integrante del cromóforo, o enlazando la cadena del polímero. Se aplican en soluciones de su forma reducida la cual una vez absorbida por la fibra, es reoxidada por el aire u otro agente oxidante y el colorante insoluble queda adherido. Son de bajo costo y producen matices opacos en algodón. Tienen buena resistencia a la luz, al lavado y a los ácidos, pero son muy sensibles al cloro o hipoclorito.	Fibras celulósicas como el algodón, rayón, tiene uso limitado con fibras de poliamida. Seda y cuero	No poseen una estructura determinada	Para teñir algodón se prepara un baño con el tinte, carbonato de sódico anhidro, sulfito sódico y agua caliente

Fuente: Barrrios-Ziolo, Et Al., 2015; Warshaw J L., 1998, Katheresa, Et Al., 2018 Marcano, 2018; Mejía, 2014; Miranda 2018;

Más de un grupo azo ($--N=N--$) puede estar presente en la estructura de los colorantes por lo que los colorantes se pueden clasificar en azo, diazo, triazo o poliazo. Este grupo es el que más se emplea en la industria textil ya que son fáciles de sintetizar, presentan una gran diversidad de estructuras y su costo de producción es bajo en comparación con otros, debido a ello la mayoría de los colorantes sintéticos poseen este grupo.

5.3.2 Contaminación del agua por la industria textil

El interés en el potencial de contaminación de los tintes y los intermedios de tinte se debe principalmente a la preocupación por su toxicidad (Anjaneyulu, Chary, Suman, 2005). El agua residual textil que contiene colorantes azo es uno de los efluentes industriales más dañinos para el medio ambiente porque la mayoría de los colorantes azoicos son coloridos y sus productos intermedios, como las aminas aromáticas, son mutagénicos y cancerígenos (González et al., 2009).

La existencia y creación de una gran variedad de estructuras como ácidos, bases, azo, diazo, antraquinonas, complejos metálicos, entre otros., dificulta la remoción de los colorantes. El desarrollo del sector textil y la demanda creciente de tejidos para la manufacturación de indumentarias ha implicado un incremento en la producción de colores, compuestos más estables y resistentes con nuevas estructuras químicas que pueden contener elementos tóxicos como cobre, níquel, zinc y cromo. La mayor parte de estos colorantes están hechos de sustancias orgánicas complejas así que pueden resistir la degradación en contacto con el agua, detergentes o cualquier otro agente de lavado. Las moléculas de colorantes pueden persistir a la degradación incluso cuando son expuestas a fuentes extremas de calor (Mahmound et al., Forgacs et al. y Joshi et al cómo se citó en Katheresan 2018). La gran heterogeneidad de estructuras y características de estas sustancias hace compleja su eliminación por medio de tratamientos convencionales en las plantas de tratamiento, causando que un alto porcentaje de colorantes transmute la química natural de los cuerpos de agua del mundo (Ahmad et al, 2015).

La cantidad de colorante desechados depende de la clase colorante empleado, que varía de solo un 2% de cuando se usan tintes básicos a un 50% de pérdida cuando se usan ciertos tintes reactivos (O'Neil et al 1999). Este alto grado de pérdida se debe a que la forma hidrolizada de los colorantes reactivos no tiene afinidad por las fibras. En el proceso de teñido de las telas en la tintura ordinaria se puede alcanzar una fijación de más del 90 % del tinte, pero en la estampación con tintes reactivos es habitual alcanzar sólo un valor del 60 % o menos. Lo que significa que más de una tercera parte del tinte reactivo entra en las aguas residuales cuando se lava el tejido una vez teñido (Warshaw

J. L, 1998). El vertido de este tipo de compuestos en los ríos, lagos y mares es relevante considerando que el color es muy visible, tan solo una pequeña cantidad de colorantes en el agua (>1 ppm) es muy visible (Malik y Grogmman,) además el daño que se origina en la vida acuática es severo, ya que esta mezcla de sustancias incrementa la concentración de sedimentos, sólidos disueltos, sales, metales pesados, fluctuaciones en parámetros de DQO, pH así como otros criterios que suelen rebasar los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad.

La descarga de efluentes colorados deteriora la calidad del agua haciéndola inadecuada para el consumo. Por una parte los animales que utilizan estas fuentes de agua pueden sufrir por la falta de agua limpia y la población que depende directa y únicamente de estas fuentes de agua puede verse privada de su consumo o lo que es peor consumirla sin saber que está contaminada (Ahmad, et al. 2015). Aunque la mayoría de los productos químicos que pueden estar presentes en el agua de consumo sólo constituyen un peligro si se produce una exposición prolongada, algunos pueden producir efectos peligrosos tras múltiples exposiciones en un periodo corto. (Organización Mundial de la Salud OMS, 2006). El agua contaminada con colorantes que entra en contacto con la piel puede causar irritación y si entra en contacto con los ojos, provocar quemaduras o incluso lesiones oculares permanentes en animales y humanos por igual (Robinson et al 2001). Se ha reportado una creciente incidencia de cáncer de vejiga en trabajadores que están expuestos a grandes cantidades de colorantes.

El uso o consumo directo de agua contaminada con distintos compuestos químicos como los colorantes no es la única vía por la que se ingieren este tipo de sustancias peligrosas ya que la exposición se puede dar de forma indirecta como lo es el consumo de productos agrícolas regados con aguas residuales no tratadas, puesto que los compuestos químicos pueden ser absorbidos por los cultivos.

En ocasiones los efluentes concentrados en colorantes son descargados inmediatamente después del proceso de teñido con una alta temperatura y pH por lo que los mecanismos de transferencia de oxígeno y los procesos de auto purificación de los cuerpos de agua se ven perturbados por estas circunstancias (Kant, 2012).

Esto hace que disminuya la penetración de la luz en las aguas superficiales, afectando el crecimiento de las especies acuáticas y los procesos de fotosíntesis de la vegetación, causando disminución de la cantidad de oxígeno disuelto. Dependiendo de la concentración de los colorantes en el agua estos pueden tener efectos graves o crónicos sobre los organismos Bae, Freeman y Dong (2006) realizaron estudios sobre la toxicidad causada por colorantes Direct Blue 218 y colorantes

directos con complejos de cobre en individuos de *Daphnia magna*. El resultado demostró que estos colorantes son muy tóxicos para estos crustáceos en una concentración letal media de CL_{50} de 48h entre 1 y 10 mg/L.

5.4 Tecnologías de remoción de colorantes

La mayoría de los colorantes son complejos de remover, la solidez del color, la estabilidad y la resistencia de los colorantes a la degradación ha hecho que la remoción de los tintes en aguas residuales industriales sea difícil (Anjaneyulu, Chary, Suman, 2005), lo cual ha originado que los costos de tratamiento de las aguas residuales sean elevados en comparación con otros tipos de efluentes, por lo que algunas industrias textiles deciden hacer sus descargas sin un tratamiento adecuado o en el peor de los casos lo hacen en la clandestinidad con el fin de ahorrar costos. No obstante con el desarrollo de la industria en general ha incrementado la preocupación y concientización del cuidado del medio ambiente gracias a que diversos estudios han demostrado los impactos negativos, daños a la salud y a los ecosistemas que genera la liberación de sustancias recalcitrantes o con características creti (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos e inflamables) provenientes de los procesos de producción industriales.

La industria de acabado textil se ha visto inmersa en una presión para reducir el uso de sustancias nocivas, especialmente los efectos mutagénicos, carcinogénicos y alergénicos de los productos químicos y tintes textiles. Es por ello que la remediación de colorantes en aguas residuales textiles no solo se basa en la remoción del color (descolorización) sino también en la degradación y mineralización de las moléculas de colorantes. La decolorización ocurre cuando las moléculas son removidas desde la solución o cuando las estructuras cromóforas se rompen, pero las moléculas del primer caso y la mayoría de los fragmentos en el segundo quedan intactos (Malik y Grohman, 2012). Hao et al (2000) como se menciona en Mendoza (2009) indica que la decoloración es simplemente la separación del color sin el verdadero rompimiento de las moléculas complejas de colorante. La adición de una solución blanqueadora puede decolorar el agua, pero el agua incolora continúa teniendo compuestos orgánicos y puede ser más tóxica que el agua residual original. Así, la desaparición de color en el agua residual no significa la degradación de las moléculas orgánicas de colorante.

Afortunadamente se han desarrollado y mejorados diferentes métodos y técnicas para el tratamiento de las aguas contaminadas por textileras con el fin de aminorar el impacto que este tipo

de aguas genera en la fauna y la salud humana. Estos procedimientos usualmente se basan en tratamientos físicos, químicos, biológicos o una combinación de las anteriores.

Los métodos físicos pueden remover el color de manera eficiente sin embargo las moléculas no son degradadas, convirtiéndose en concentrados que requieren una correcta disposición. Lo mismo ocurre con las técnicas químicas, pues a pesar de que los colorantes son removidos la acumulación de lodos concentrados puede crear problemas de disposición (Malik y Grohman, 2012). Los métodos biológicos son considerados más viables ya que pueden mineralizar estructuras complejas, sin embargo, los requerimientos metabólicos de los diferentes microbios son complejos, lo que impide la utilización de una sola especie para la remediación de una gran cantidad de aguas residuales coloreadas (Ekramul, Dhar y Hossain, 2018)

En la siguiente tabla se muestran algunas desventajas de los métodos mencionados así como algunas técnicas.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de algunos métodos de remoción de colorantes

Método	Ejemplo	Desventajas
Físico	<p>Membranas</p> <p>Nanofiltración</p> <p>Osmosis inversa</p> <p>Electrodialisis</p> <p>Absorción</p>	<p>Altos costos</p> <p>Baja eficiencia</p> <p>No se degradan los compuestos contaminantes</p> <p>Es selectivo</p> <p>Disposición de residuos</p> <p>Generación de lodos</p> <p>Empleo de altas cantidades de energía en comparación con los otros métodos</p>
Químicos	<p>Coagulación</p> <p>Floculación</p> <p>Electro flotación</p> <p>Oxidación</p>	<p>Altos costos</p> <p>Baja eficiencia</p> <p>Es selectivo</p> <p>Uso de agentes químicos</p>

	Reacción fenton Irradiación Ozonación	Necesidad de equipo especializado Interferencias debido a los constituyentes del agua residual Alta demanda de energía eléctrica Generación de lodos
Biológicos	Bacterias Hongos Enzimas	Aislamiento y purificación Resistencia a compuestos recalcitrantes Largos periodos de tiempo para degradar Trabajan bajo ciertas condiciones

Las ventajas de los tratamientos biológicos sobre los fisicoquímicos es que remueven la DBO, COD y los sólidos suspendidos. La principal limitación puede estar relacionada con la toxicidad de algunos colorantes y / o los productos de degradación de los organismos utilizados en el proceso.

La mayor desventaja de estos tratamientos es que trabajan bajo ciertas condiciones que de no ser cumplidas no remueven la mayoría de los compuestos contaminantes, algunos los transfieren de una fase a otra y en ocasiones generan sustancias más tóxicas. Para Garces & Peñuela (2007) Los métodos más deseables para tratar efluentes acuosos son aquellos capaces de mineralizar los contaminantes residuales o transformarlos en materiales inocuos al hombre y a la naturaleza a un bajo costo. Mientras que para Katheresan et al (2018) un método ideal de remoción de colorantes debe ser aquel que sea capaz de remover eficientemente grandes cantidades de colorantes en las aguas residuales en un periodo corto de tiempo sin la producción de una contaminación secundaria

El desarrollo de tecnologías eficientes, económicas y ecológicas para disminuir el contenido de colorantes en las aguas residuales a niveles aceptables a un costo accesible es de suma importancia (Rodriguez, 2009).

5.5 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis con luz solar se presenta como una alternativa sencilla y económica para el tratamiento de aguas residuales coloreadas de efluentes de la industria textil. Este sistema permite

aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie terrestre para provocar una serie de reacciones químicas (redox) que dan lugar a la eliminación de los compuestos orgánicos en las aguas de vertidos (Garcés y Peñuela, 2007).

Sun et al. Cómo se cita en Gelover (2013) indica que la fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante, visible o UV, por un sólido denominado foto catalizador, que normalmente es un semiconductor de banda ancha. En la región interfacial entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o de remoción de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos. Los fotocatalizadores más investigados, hasta el momento, son los óxidos metálicos semiconductores de banda ancha. Uno de los catalizadores más utilizados es el TiO_2 sin embargo existen otros compuestos que tienen el potencial de incrementar la tasa de reacción dado que también son aceptores de electrones.

El TiO_2 ha sido ampliamente estudiado en la eliminación de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, comprobándose su estabilidad a lo largo de numerosos ciclos, no obstante, siguen existiendo diversas limitaciones que dirigen nuevos esfuerzos al aumento de la eficiencia del proceso fotocatalítico. Se ha encontrado que las condiciones óptimas para la decoloración son diferentes para cada colorante, lo que indica que el desarrollo de un método de oxidación general para una mezcla de tintes puede ser muy difícil. El empleo de oxidantes químicos adicionales puede mejorar la eficiencia del proceso fotocatalítico facilitando el atrapamiento de electrones y disminuyendo, por tanto, la probabilidad de recombinación. Además estos oxidantes pueden ser una fuente adicional de generación de radicales hidroxilo u otras especies oxidantes que, de este modo, promueven un aumento de la velocidad de oxidación (Carbajo, 2013)

La baja capacidad de la radiación UV para penetrar en un medio que contiene una suspensión de fotocatalizador es una de las limitaciones más importantes del procedimiento fotoquímico (Gomes, Sánchez, Duran 1999). En fotocatalisis heterogénea los parámetros de operación gobiernan la cinética del proceso fotocatalítico, entre ellos cabe destacar: intensidad y distribución espectral de la radiación, concentración y tipo de oxidante, concentración de sustrato o contaminante, concentración de catalizador, pH del medio.

5.6 Biodegradación por medio de consorcios bacterianos

La biorremediación del agua a partir de microorganismo ha permitido la eliminación de compuestos complejos, el uso de bacterias ha sido examinado a lo largo de estos últimos años y se han elaborado estudios de degradación de colorantes específicos demostrando que algunas bacterias

utilizan los contaminantes como sustrato. En la literatura hay muchos informes sobre la capacidad de los cultivos puros para decolorar tintes, empero estos no encuentran muchas aplicaciones en los sistema de tratamiento de efluentes industriales debido a la heterogeneidad de los componentes en los efluentes que dependen de los programas de producción. Es por ello que los sistemas de tratamiento que tienen poblaciones microbianas mixtas son más efectivos debido a las actividades metabólicas concertadas (Singh, Saini, Sharma, Chadha y Chimni, 2005). Ekrammul, Dhar, y Hossain (2017) en su estudio indican que el desarrollo de consorcios bacterianos fue más eficiente al decolorar soluciones de colorantes puros, así como una mezcla de ellos en comparación con cultivos puros. Lalnunhlimi y Krishnaswamy (2014) reportan que un consorcio bacteriano enriquecido puede decolorar eficientemente hasta 97.57% y 95.25% de los colorantes azul directo 151 y 31 respectivamente, en 5 días

Las ventajas del uso de cultivos mixtos (consorcios) son evidentes ya que algunas cepas pueden realizar trabajos de biodegradación en conjunto, que en contraste, ninguna cepa pura individual lograría (Nigan, Banat, Singh y Marchat, 1995). La degradación depende en gran medida de la estructura del o los colorantes a remover, la fuente de energía y las condiciones del ambiente.

Aunque la reducción anaeróbica de los colorantes azoicos es generalmente más satisfactoria que la degradación aeróbica, los productos intermedios (aminas aromáticas cancerígenas) deben degradarse mediante un proceso aeróbico. (Forgacs, Cserhádi y Oros, 2004). En condiciones anaeróbicas, se ha informado que muchas bacterias decoloran fácilmente los colorantes azoicos. Inicialmente, las bacterias provocan la escisión reductora del enlace azo, lo que da como resultado la decoloración del tinte y la producción de aminas aromáticas incoloras (McMullan, et al 2001).

El provecho que se encuentra en el uso de procesos biológicos sobre procesos convencionales incluyen la conversión de compuestos orgánicos en productos no tóxicos (agua y dióxido de carbono), su costo relativamente bajo, la sustentabilidad y su uso fácil (Ekrammul et al. 2017).

5.7 Espectrofotometría de UV-Vis para cuantificar la degradación

En la percepción del color existen dos interacciones principales del objeto con el iluminante: la absorción y la dispersión. La absorción es selectiva en una región del espectro visible y es responsable del tinte. En un sistema transparente sólo la absorción es importante para definir el tinte, mientras que la dispersión, generalmente múltiple, provoca opacidad y ocurre en sólidos o en líquidos densos iluminados. De acuerdo la ley de Beer-Lambert, en los sistemas transparentes la transmitancia

(proporcional al inverso de la absorbancia) depende de la absorptividad, de la distancia recorrida por el iluminante a través de la muestra y de la concentración del colorante en la muestra.

En el equipo de UV-vis se estudian las interacciones entre la muestra y la radiación en el rango UV-Vis, así en el equipo se puede obtener la absorbancia de la luz y obtener la concentración mediante la ley Beer-Lambert que establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la muestra.

6. Marco metodológico

6.1 Materiales y equipo

En el proceso de fotocatalisis para la degradación de agua residual textil se emplearon los catalizadores $\text{SiO}_2/\text{Erionita}$, $\text{SiO}_2/\text{Z17}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$, $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$, Erionita, Z17 y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$, los cuales fueron proporcionados por la Dra. Gabriela Pérez Osorio (profesora investigadora de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla), quién sintetizó estos materiales por el método sol-gel y los caracterizó por medio de diferentes técnicas. Las tablas 6 y 7 presentan los resultados de solo dos de estas técnicas empleadas y pertenecen a la composición nominal, composición química elemental (tres puntos de análisis).

La muestra de agua residual textil igualmente fue proporcionada por la Dra. Gabriela Pérez Osorio, esta muestra compuesta fue recolectada dentro de las instalaciones de una empresa textil en el estado de Puebla y se almacenó a 5°C . Cabe mencionar que debido a la naturaleza de los procesos productivos el agua residual contenía una gran cantidad de sólidos y partículas suspendidas

Para la realización de la fotocatalisis heterogénea se empleó un colector solar conformado por 5 tubos de vidrio conectados cada uno en la parte posterior con una bomba que permitió la aireación del agua residual, y en la parte superior se ensambló un sistema de refrigeración con tubos condensadores provistos de dos conexiones que permitieron acoplar mangueras de caucho en la entrada y salida, para que el agua (líquido refrigerante) se recirculara con ayuda de bombas, las cuales, se mantuvieron con un flujo de aire de $400 \text{ cm}^3/\text{min}$, cada tubo con muestra se colocó en una lámina de aluminio la cual permitió que los rayos UV se reflejaran e incidieran sobre las muestra.

Tabla 6. Catalizadores empleados para fotocátalisis Catalizadores empleados para la fotocátalisis heterogénea

No.	Catalizador	Composición nominal (%)	Nomenclatura
1	SiO ₂ /Erionita	75-25	SI75-ERI25
2	SiO ₂ /Z17	75-25	SI75-CLI25
3	Al ₂ O ₃ /Z17	50-50	AL50-CL150
4	SiO ₂	100	SI100
5	Al ₂ O ₃	100	AL100
6	Erionita	100	
7	Z17	100	
8	Al ₂ O ₃ /Zn	100/3.26	

Tabla de elaboración propia. Fuente: Dra. Gabriela Pérez Osorio

Tabla 7. Composición química elemental-EDS

Catalizador	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	O	Zn	F	C	Total
SiO ₂ /Erionita	1.14		1.65	31.67	0.22	0.19		45		20.14		100
SiO ₂ /Z17	0.50		0.77	29.76	0.30	0.30		44.93		14.33	9.41	
Al ₂ O ₃ /Z17	0.88		33.23	8.36	0.23	0.74		56.56				100
SiO ₂				36.86				53.43		9.70		100
Al ₂ O ₃			52.93					47.07				100
Erionita	3.43	1.1	8.36	33.42	2.14	1.52	1.20	48.82				100
Z17	3.62	0.92	6.79	34.69	1.62	1.60	1.84	48.92				100
Al ₂ O ₃ /Zn			19.10					29.55	51.35			100

Tabla de elaboración propia. Fuente: Dra. Gabriela Pérez Osorio

Los microorganismos que se emplearon para formar los consorcios fueron bacterias aisladas de jales mineros las cuales están denominadas por los siguientes códigos mostrados en la tabla 8 donde también se indica los géneros a los que pertenecen estos microorganismos.

Tabla 8. Bacterias empleadas para la biodegradación

Código	Genero
BO3	<i>Pseudomonas putida</i>
B44	<i>Pseudomonas putida</i>
K120	<i>Serratia</i>
K131	<i>Enterobacter</i>
MC188	<i>Enterobacter</i>
N9	<i>Enterobacter</i>
N16	<i>Escherichia Coli</i>
13	<i>Enterobacter aerogenes</i>
19	<i>Enterobacter hormaechei</i>
20	<i>Enterobacter hormaechei</i>
31	<i>Enterobacter aerogenes</i>

Nota: Para las pruebas preliminares solo las primeras 8 bacterias (B03, B44, K120, K131, MC188, N9 Y N16) fueron empleadas para conformar los consorcios, las bacterias restantes (13, 19, 20, 31) fueron introducidas en las pruebas finales.

Para determinar la degradación del contenido de colorantes se empleó un equipo de espectrometría UV-Vis de la marca Perkin Elmer para medir la absorbancia.

6.2 Pruebas preliminares. Selección de conjuntos catalizador-consorcios más efectivos

6.2.1 Tratamiento preliminar con fotocátalisis

6.2.1.1 Preparación de la muestra

Antes de realizar la fotocátalisis heterogénea se realizaron lecturas de la absorbancia de la muestra textil posteriormente la muestra se sometió a un proceso de adsorción en el cual se dispersó 45 mg de cada catalizador en 0.450 L de muestra de agua textil en distintos recipientes, se sometió a agitación en ausencia de luz durante 24h.

6.2.1.2 Degradación por fotocátalisis

Después de la adsorción de las muestras estas se colocaron en el colector solar a las mismas condiciones de temperatura y tiempo de radiación el cual fue de 6 horas. En total se probaron 8 catalizadores para el proceso de fotocátalisis más un duplicado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ y un blanco de agua residual, a partir de estas 10 muestras (residuos de fotocátalisis) se realizaron las pruebas microbiológicas para seleccionar el mejor conjunto.

La efectividad de la fotocátalisis y de las siguientes etapas se cuantifico con el espectrofotómetro UV-Vis, para poder determinar el proceso de la degradación mediante la absorbancia.

En la sección de resultados se muestran los gráficos absorbancias obtenidas de todo el proceso a partir.

6.2.2 Conjunción fotocátalisis - Microbiológico

6.2.2.1 Preparación del inóculo- Biodegradación por cepa

Antes de constituir los consorcios se realizaron ensayos entorno a la efectividad de las bacterias (B03, B44, K120, K131, MC188, N9 y N16) en cuanto a degradación de colorantes del agua textil, para ello se inocularon 500 μl de cada bacteria en un volumen de 5 mL de caldo Luria Bertani LB (1L-10g NaCl, 10g peptona de caseína y 5g de Levadura) y se incubaron durante 2 días a 30°C, en seguida el caldo se centrifugó en tubos eppendorf a 10,000 rpm durante 10 min, se separó el sobrenadante de la biomasa y se resuspendió en 1 mL de medio mínimo mineral (1L- 0.4g KH_2PO_4 , 2g K_2HPO_4 , 0.1g CaCl_2 , 0.005g FeSO_4 , 0.002Gg H_3BO_4 , 0.005g ZnSO_4 , 0.001g $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,

0.003g MnSO₄, 0.001g CoSO₄, 0.001g NiSO₄, 1g glucosa, 0.1g sacarosa, 0.1g sacarosa, 1g CH₂H₃NaO₂, 1g citrato de sodio, 1g manitol).

Posteriormente la suspensión se volvió a centrifugar (10,000 rpm durante 10 min), se retiró el sobrenadante y se agregó 1ml de agua residual para re suspender la biomasa bacteriana, se tomaron 0.5 ml de la solución de cada bacteria y se agregaron en diferentes tubos que contenían 2.5 ml de agua residual, incubando a 30°C durante 24hr tomando evidencia fotográfica (imágenes 2-8). Finalmente la cuantificación de la degradación del agua residual se realizó con el espectrofotómetro UV-Vis con el sobrenadante del centrifugado.

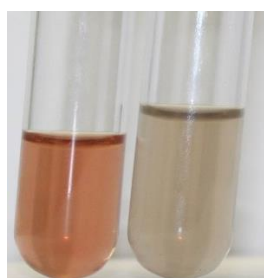


Figura 2. Degradación de agua residual por bacteria B03 (*Pseudomonas putida*)



Figura 3. Degradación de agua residual por bacteria B44 (*Pseudomonas putida*)



Figura 4. Degradación de agua residual por bacteria K120 (*Serratia*)

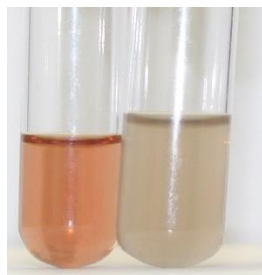


Figura 5. Degradación de agua residual por bacteria K131 (*Enterobacter*)

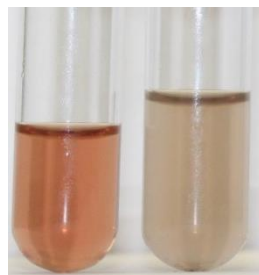


Figura 6. Degradación de agua residual por bacteria MC188 (*Enterobacter*)

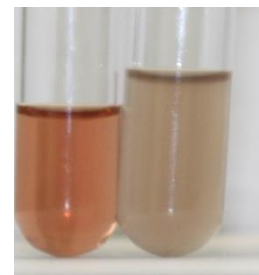


Figura 7. Degradación de agua residual por bacteria N9 (*Enterobacter*)

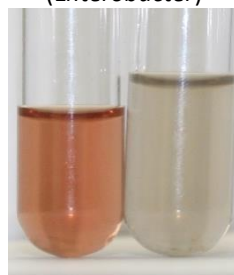


Figura 8. Degradación de agua residual por bacteria N16 (*Enterobacter*)

6.2.2.2 Preparación de consorcios

Después de comprobar la efectividad de los microorganismos, los consorcios fueron conformados de acuerdo al comportamiento de las bacterias (B03, B44, K120, K131, MC188, N9 Y N16). Para ello la biomasa bacteriana se magnificó en caldo LB inoculando 500 µl en tubos de ensaye (uno por cada bacteria) que contenían un volumen de 5ml de caldo, los tubos se incubaron durante 2 días, y después el contenido fue vertido en diferentes matraces con 50 ml de caldo LB en condiciones de esterilidad, incubando a 30°C durante un periodo de 5 días, posteriormente se centrifugaron los cultivos en tubos falcón a 8000 rpm durante 10 min con el fin de concentrar la biomasa, el sobrenadante se retiró y la biomasa se resuspendió en 50 ml de medio mínimo mineral. A partir de ello se formaron cinco consorcios de acuerdo a la tabla 9, cada uno en un volumen final de 10ml.

Tabla 9 Conformación de consorcios bacterianos

Numero de consorcio	Clave	Géneros
1	N9	<i>Enterobacter</i>
	B44	<i>Pseudomonas putida</i>
	MC188	<i>Enterobacter</i>
2	N16	<i>Escherichia Coli</i>
	B03	<i>Pseudomonas putida</i>
	K120	<i>Serratia</i>
3	K131	<i>Enterobacter</i>
	N9	<i>Enterobacter</i>
	MC188	<i>Enterobacter</i>
4	N9	<i>Enterobacter</i>
	N16	<i>Escherichia Coli</i>
	MC188	<i>Enterobacter</i>
5	B03	<i>Pseudomonas putida</i>
	B04	<i>Pseudomonas putida</i>
	MC188	<i>Enterobacter</i>

6.2.2.3 Biodegradación por medio de consorcios

Se inocularon 100 µl de cada consorcio por cada muestra con catalizador en tubos de ensaye que contenían 5 ml del residuo de fotocátalisis, en total se realizaron 45 ensayos diferentes (8 catalizadores x 5 consorcios), las muestras se incubaron a 30°C por 24 horas en las cuales se fueron tomando registros fotográficos después de 4, 8 y 24 horas para observar el procesos de degradación, como se observa en las siguientes imágenes (9-18). La tabla 10 muestra la nomenclatura empleada para la identificación de los catalizadores y consorcios empleados en cada ensayo.

Tabla 10. Nomenclatura para la identificación de catalizadores y consorcios

Muestra	Catalizador	Nomenclatura	Consorcio	Nomenclatura
1	SiO ₂ /Erionita	M1	1	C1
2	SiO ₂ /Z17	M2	2	C2
3	Al ₂ O ₃ /Z17	M3	3	C3
4	Al ₂ O ₃ /Z17	M4	4	C4
5	SiO ₂	M5	5	C5
6	Al ₂ O ₃	M6		
7	Erionita	M7		
8	Z17	M8		
9	Al ₂ O ₃ /Zn	M9		
10	Blanco	M10		

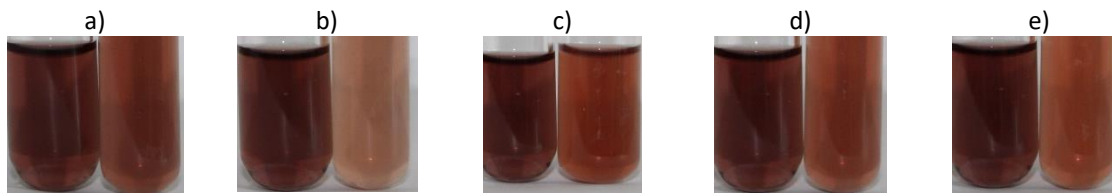


Figura 9. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{SiO}_2/\text{Erionita}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

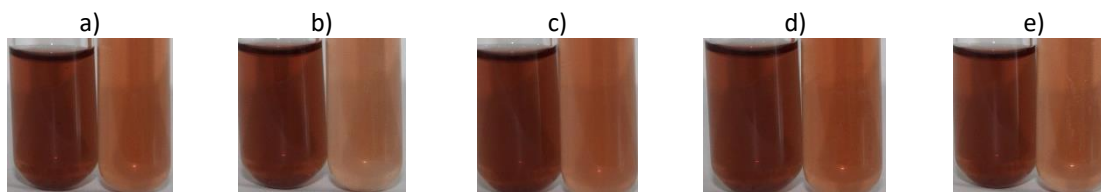


Figura 10. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{SiO}_2/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

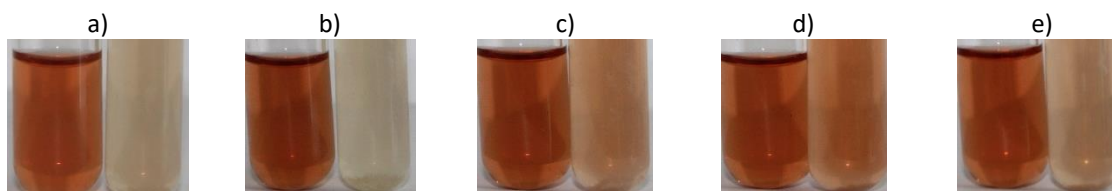


Figura 11. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

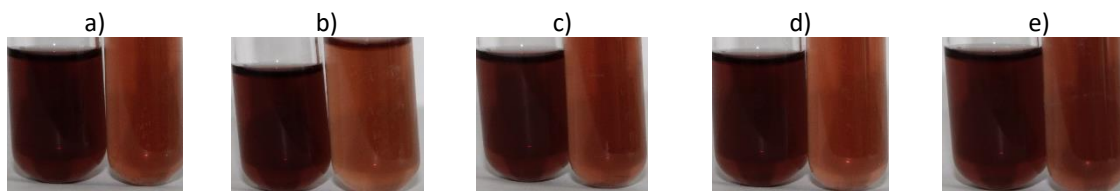


Figura 12. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

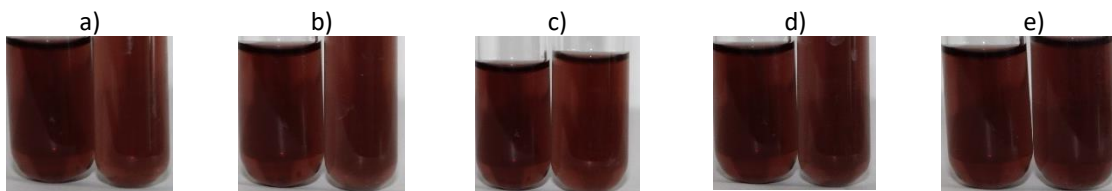


Figura 13. Biodegradación del residuo de fotocatalisis SiO_2 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

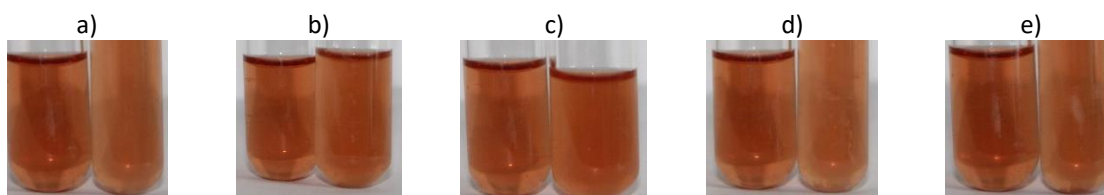


Figura 14. Biodegradación del residuo de fotocatalisis Al_2O_3 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

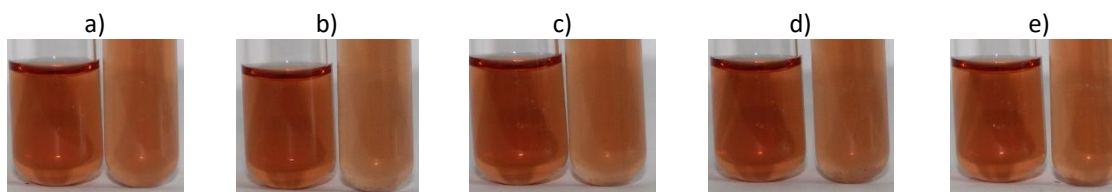


Figura 15. Biodegradación del residuo de fotocatalisis Erionita por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

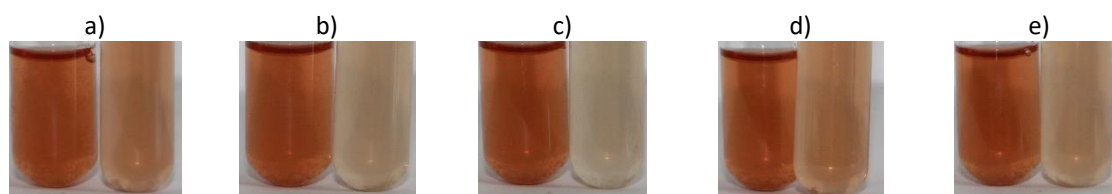


Figura 16. Biodegradación del residuo de fotocatalisis Z17 por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

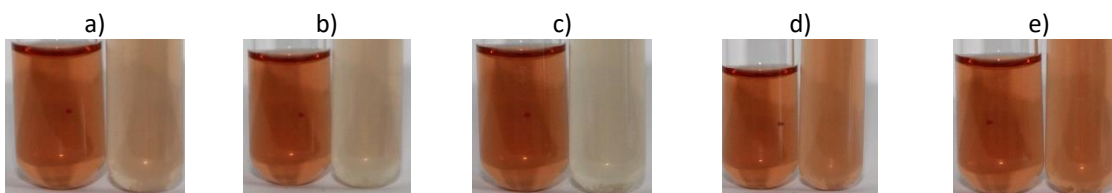


Figura 17. Biodegradación del residuo de fotocatalisis $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$ por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

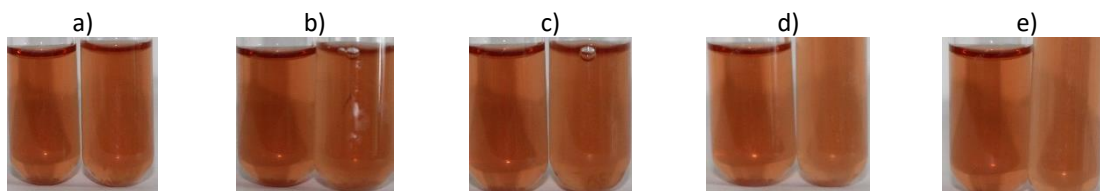


Figura 18. Biodegradación del residuo de fotocatalisis blanco por medio de los consorcios C1 (a), C2 (b), C3 (c), C4 (d) y C5 (e), después de 24 h (izquierda muestra blanco, derecha muestra con consorcios).

La aptitud de este sistema se midió en el espectrofotómetro UV-VIS con el sobrenadante posterior a la centrifugación (5000 rpm durante 10 minutos). A partir de lo obtenido se seleccionaron los mejores conjuntos y finalmente se realizaron nuevos ensayos con los conjuntos más aptos.

6.3 Pruebas finales. Tratamiento con conjuntos catalizador-consorcios seleccionados

A partir de los catalizadores y consorcios más efectivos que se muestran en la tabla 11, se realizaron las pruebas finales de fotocátalisis y biodegradación del agua residual textil adicionando a los consorcios otras 4 cepas las cuales han mostrado buenos resultados en la degradación de contaminantes tal como se demostró en anteriores trabajos de tesis.

Tabla 11. Pruebas finales. Catalizadores y consorcios (adicionados con otras 4 cepas) empleados.

Catalizador	Consorcio	Nomenclatura de cepas adicionadas
Erionita	C2	13, 19, 20 y 31
SiO ₂ /Z17		
SiO ₂	C4	13, 19, 20 y 31
Al ₂ O ₃		

Nota: el nombre de las especies a las que pertenecen las cepas adicionadas se encuentra en la tabla 8.

Antes de realizar los ensayos se obtuvieron lecturas de la absorbancia del agua residual textil en el equipo de espectrofotometría UV-Vis con el fin de comparar los resultados de las siguientes etapas.

La preparación de la muestra con cada catalizador se realizó siguiendo el mismo procedimiento que en las pruebas preliminares de fotocátalisis, sin embargo, en esta ocasión la exposición se llevó a cabo durante 8 horas de radicación solar (figura 19), midiendo la absorbancia inicial y final de la muestra en el equipo de espectrofotometría de UV-Vis.

Esta vez los consorcios se prepararon, inoculando 1L de caldo LB por cada bacteria con 4 tubos por cepa y se incubaron por 3 días. Se siguieron los mismos procedimientos para la constitución

de los consorcios: la biomasa se resuspendió en 50ml de medio mínimo mineral y se obtuvo 10 ml de cada consorcio



FIGURA 19. FOTOCATÁLISIS DE LA ETAPA FINAL

.Se colocaron 50 ml del blanco y de cada residuo de fotocatalisis por duplicado (10 tomas en total) en tubos falcon para después agregar 1 ml de los consorcios 2 y 4 (5 muestras por consorcios). Se incubaron durante 3 días periodo en el cual se fueron tomando volúmenes de 5ml para medir la absorbancia y tomar registros fotográficos. Ver figura 20.

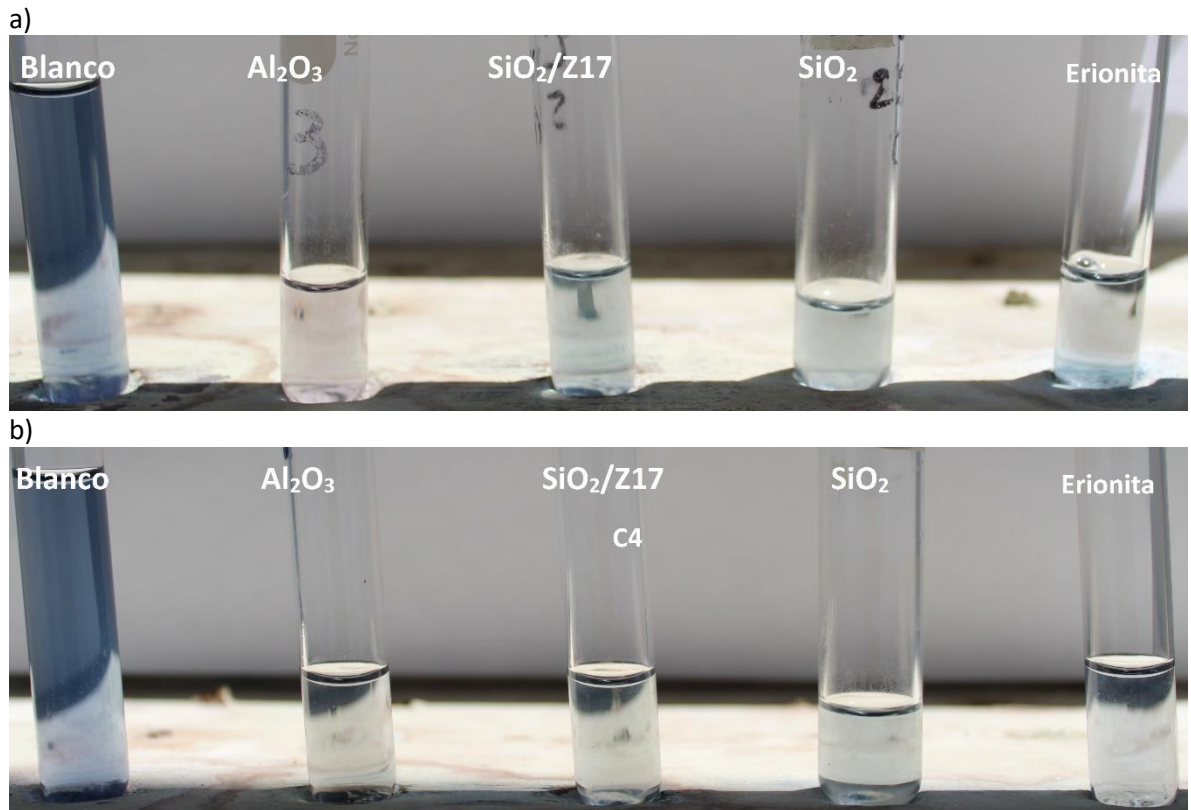


Figura 20. Pruebas finales. Biodegradación de los consorcios 2 (a) y 4(b) después de 3 días de haberlos adicionado en los residuos de fotocatalisis.

7. Resultados

7.1 Remoción de colorantes por pruebas preliminares

7.1.1 Degradación de colorantes por medio de Fotocatálisis

Después de realizar la fotocatalisis en el agua residual textil con diferentes catalizadores ($\text{SiO}_2/\text{Erionita}$, $\text{SiO}_2/\text{Z17}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$, SiO_2 , Al_2O_3 , Erionita, Z17, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$) se cuantificó la degradación del contenido de colorantes mediante el equipo de espectrofotometría UV-Vis y se obtuvo el siguiente gráfico.

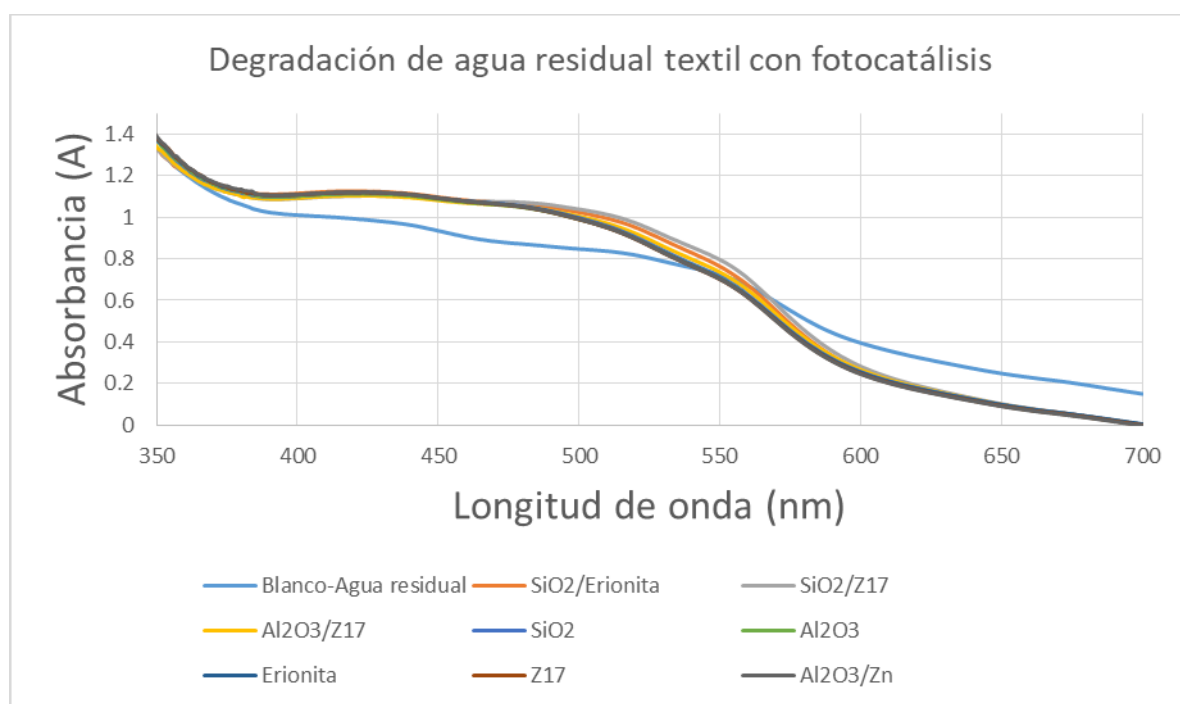


Figura 21. Degradación de agua residual textil por medio de fotocatalisis

El proceso de degradación de agua residual textil mediante fotocatalisis después de las 6 horas fue similar en todos los catalizadores usados siendo los resultados de degradación de la siguiente manera en orden descendente $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$, Al_2O_3 , erionita, Z17, SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$, $\text{SiO}_2/\text{erionita}$ y finalmente $\text{SiO}_2/\text{Z17}$ como se aprecia en la figura 21.

7.1.2 Degradación de colorantes con el sistema Fotocatálisis - Microorganismos

A continuación se muestran los gráficos obtenidos de las pruebas de fotocátalisis microorganismos

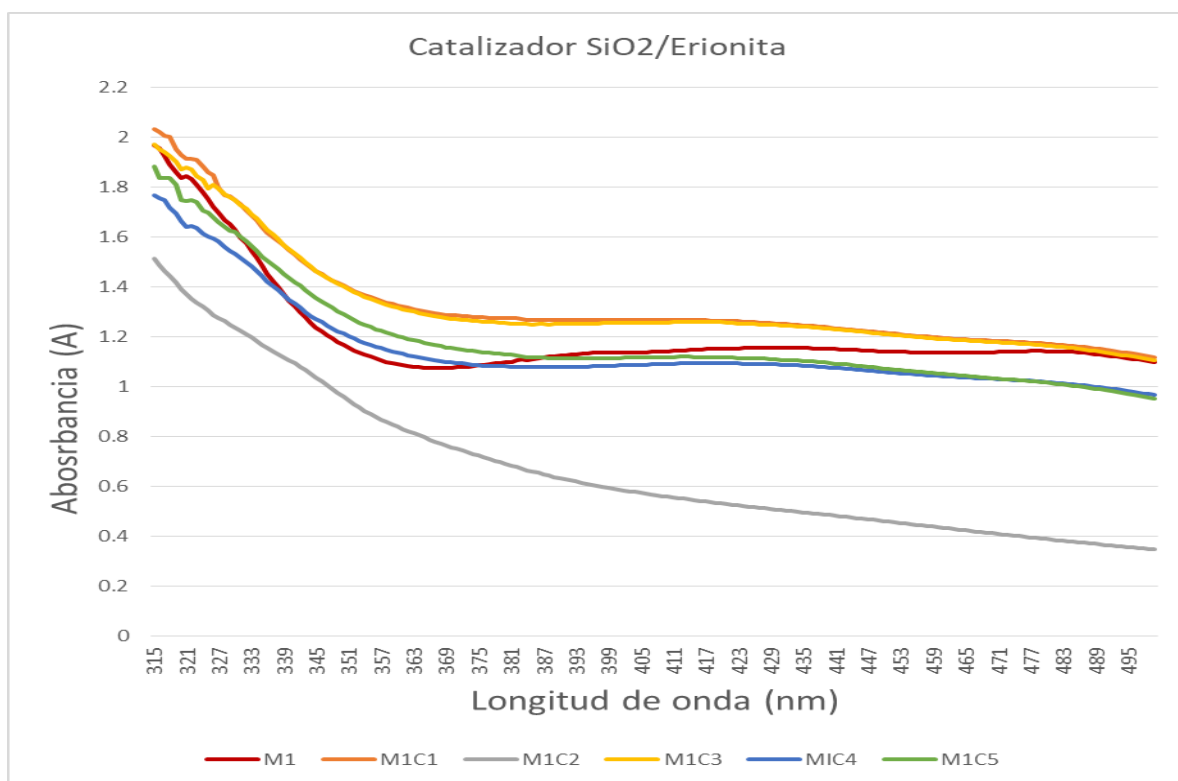


Figura 22. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador SiO₂/Erionita con consorcios bacterianos.

La biodegradación del residuo de fotocátalisis (catalizador SiO₂/Erionita) con consorcios microbianos indica que el mejor resultado fue por la acción de las bacterias del consorcio 2 seguido de los consorcios 4, 5, 3 y 1, estos últimos obtuvieron la menor actividad de biodegradación, como se muestra en la figura 22.

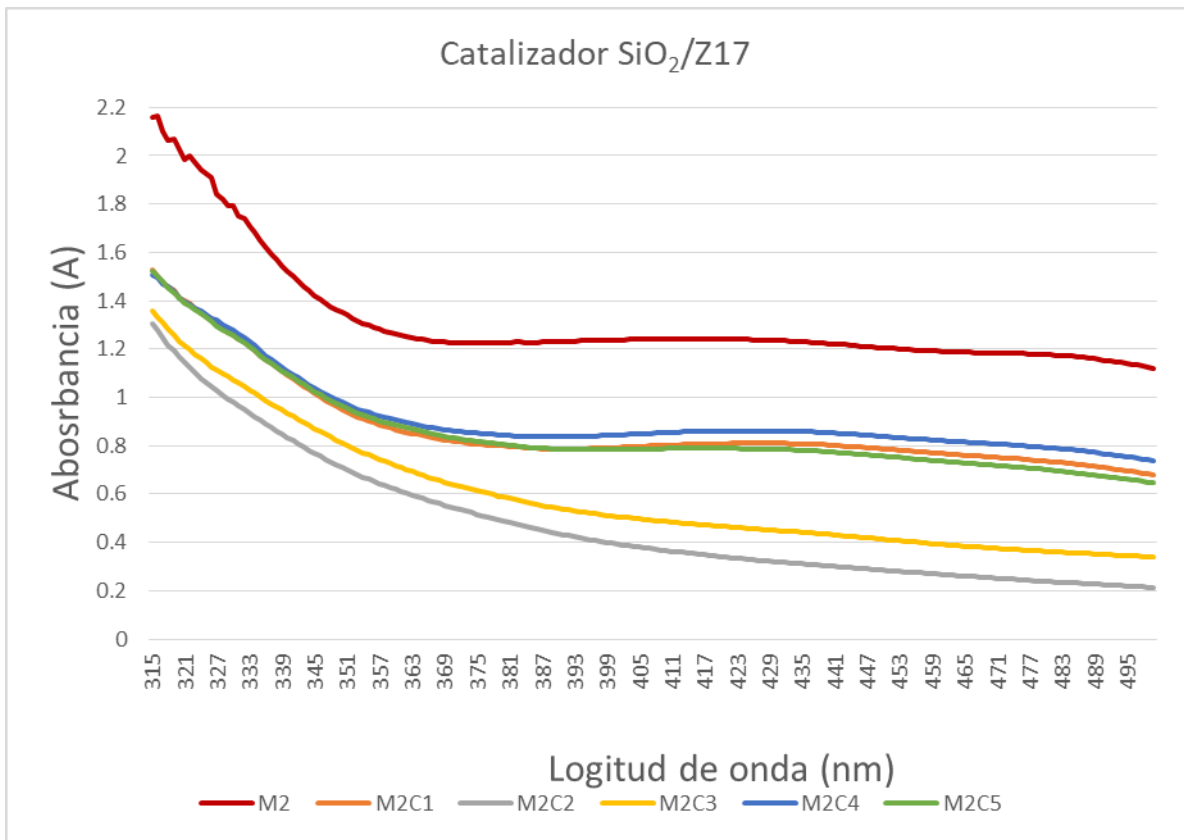


Figura 23. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador SiO₂/Z17 con consorcios bacterianos.

El residuo de fotocátalisis con SiO₂/Z17 tratado con microorganismos nos indica que la mejor respuesta biodegradativa correspondió al consorcio 2, seguido inmediatamente por los consorcios 3, 5, 1 y 4. Estos últimos a pesar de no ser tan efectivos manifestaron actividad microbiana al reducir la absorbancia del agua tal como se aprecia en la figura 23.

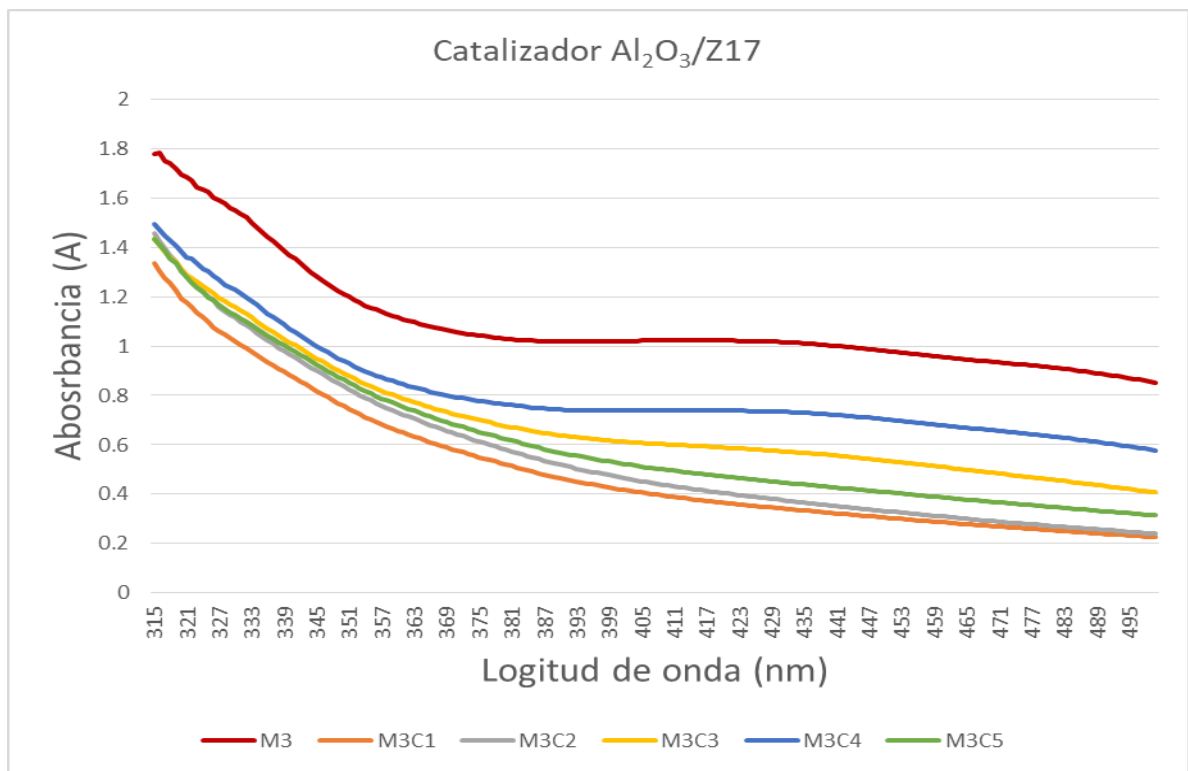


Figura 24 Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ con consorcios bacterianos

En la figura 24 el residuo de fotocátalisis con catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ muestra que la actividad biodegradativa de los consorcios ocurrió en el siguiente orden descendente 1 y 2 obtuvieron los mejores resultados, 5, 3 y 4, también degradaron el contenido de colorantes pero cada uno con una actividad bacteriana más baja que el anterior.

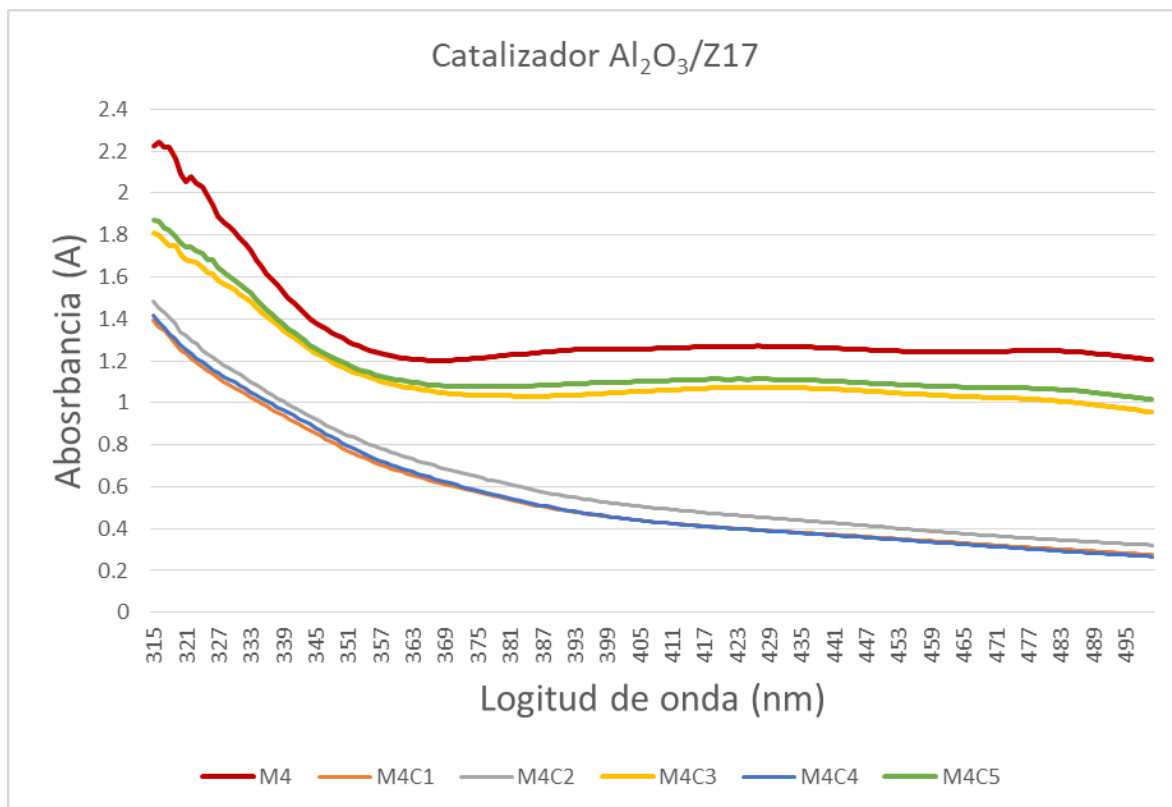


Figura 25. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$ con consorcios bacterianos.

En el residuo de fotocátalisis catalizador $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Z17}$, con una actividad similar los consorcios que lograron una mayor biodegradación fueron 1 y 4, en menor media 2 y finalmente 3 y 5 los cuales no obtuvieron una actividad degradativa tan eficiente como los anteriores consorcios, sin embargo lograron atenuar el residuo de fotocátalisis como se aprecia en la figura 25.

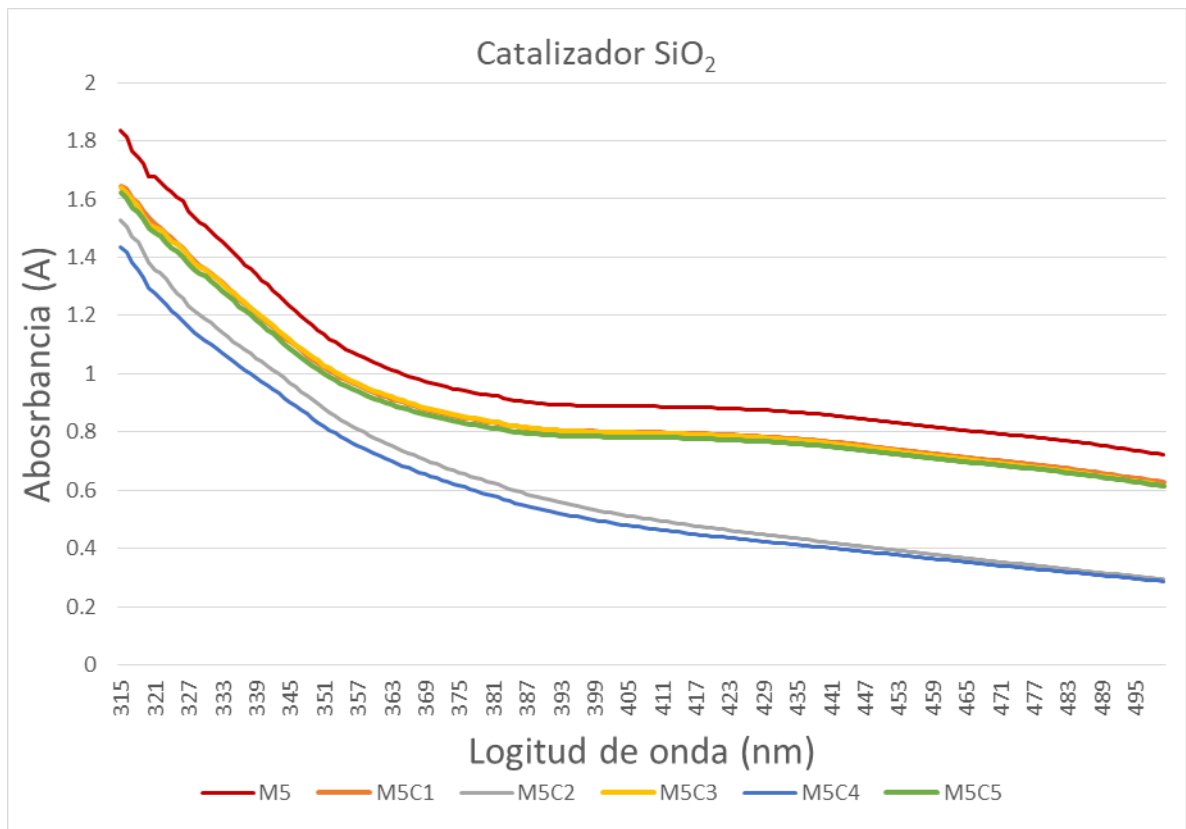


Figura 26. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador SiO_2 con consorcios bacterianos.

En la figura 26 se observa que en la muestra resultante de fotocátalisis (catalizador SiO_2) los microorganismos que lograron una mayor biodegradación del agua fueron aquellos que pertenecen a los consorcios 2 y 4, seguidos de 5, 1 y 3 los cuales obtuvieron resultados de absorbancia por arriba de los primeros y similares entre sí.

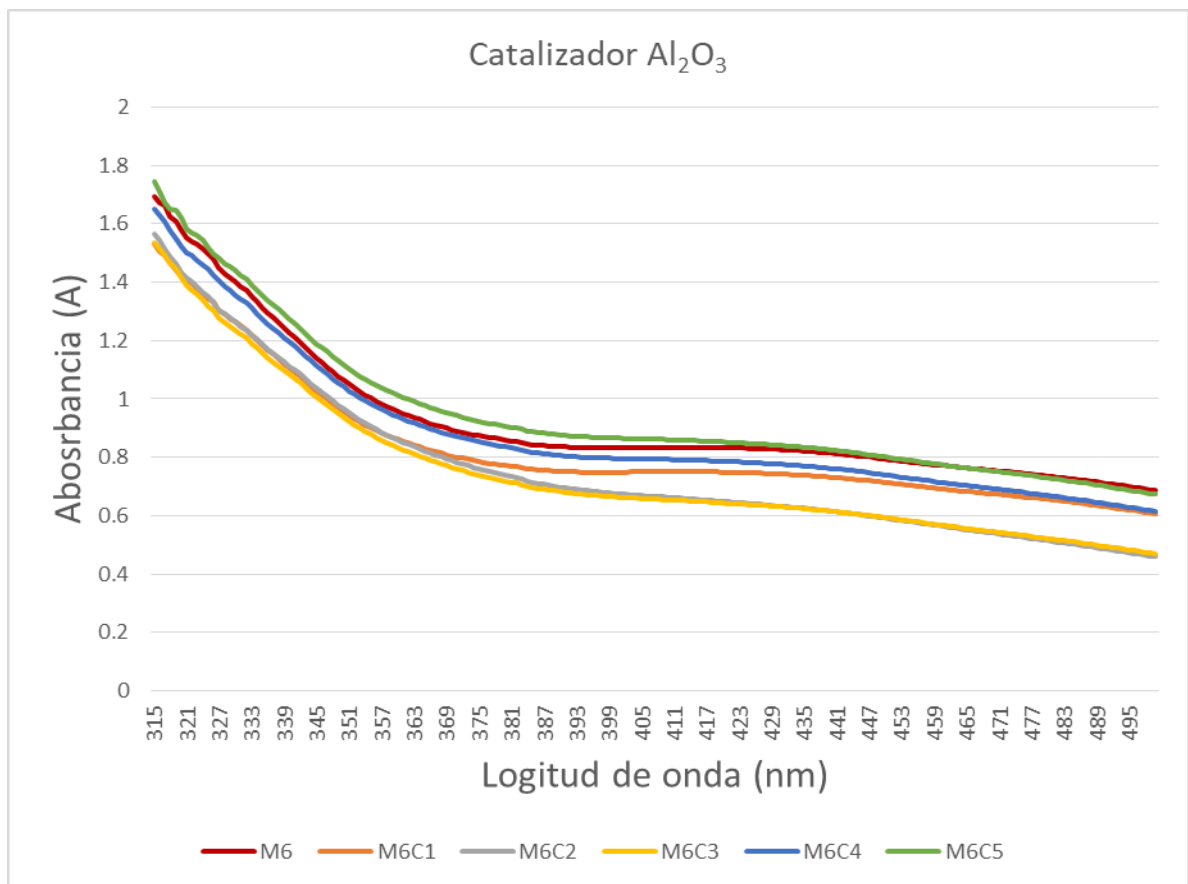


Figura 27. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Al₂O₃ con consorcios bacterianos

En la biodegradación del residuo de fotocátalisis (catalizador Al₂O₃) la figura 27 indica la biodegradación para cada consorcio los cuales presentaron una acción bacteriana similar siendo la degradación en el siguiente orden descendente 3, 2, 1, 4 y 5, los primeros dos debido a su actividad microbiana obtuvieron los mejores resultados en la biodegradación del agua, en cambio los últimos obtuvieron una actividad microbiana menor.

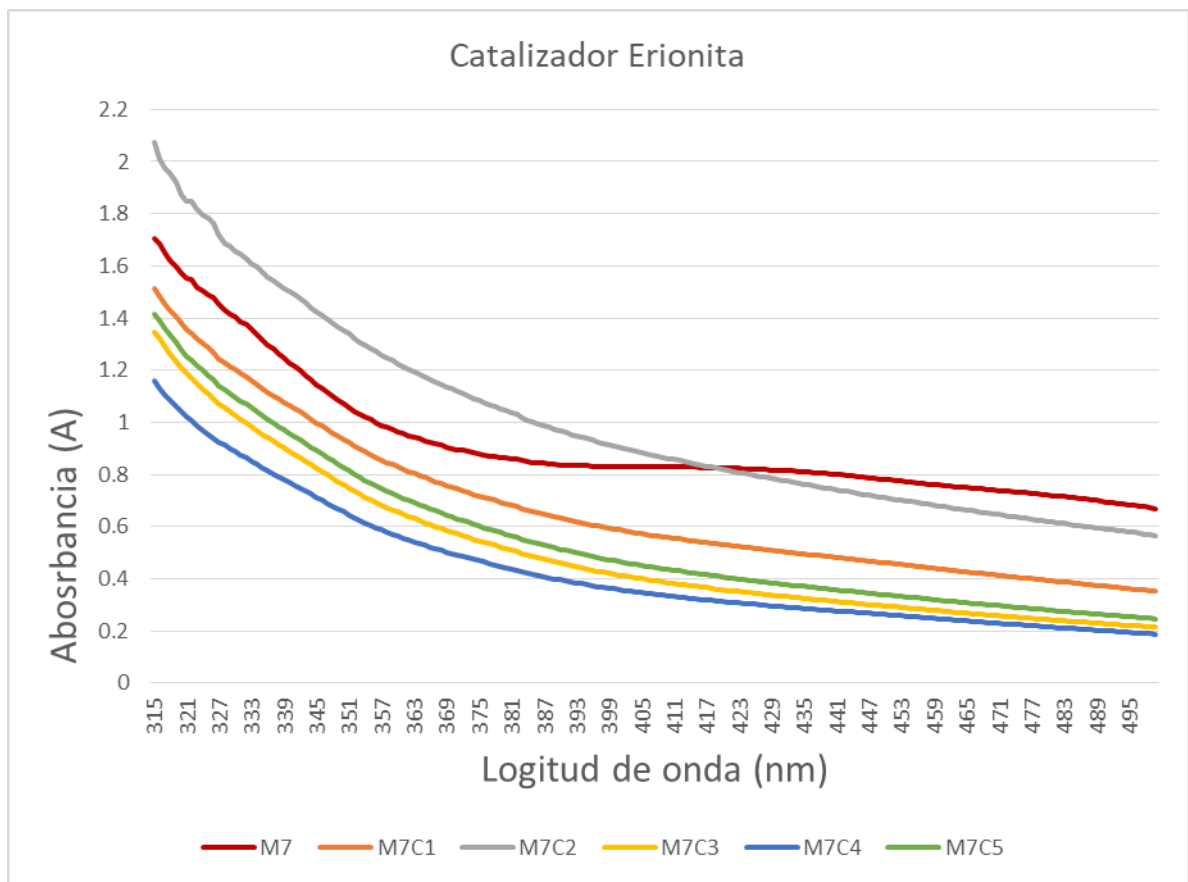


Figura 28. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador erionita con consorcios bacterianos

Para el residuo de fotocátalisis empleando catalizador erionita, los primeros 3 consorcios obtuvieron una actividad similar, siendo el mejor resultado de biodegradación para el consorcio 4, seguido de los consorcio 3, 5 y 1, mientras que 2 efectuó la actividad bacteriana más reducida, como se visualiza en la figura 28.

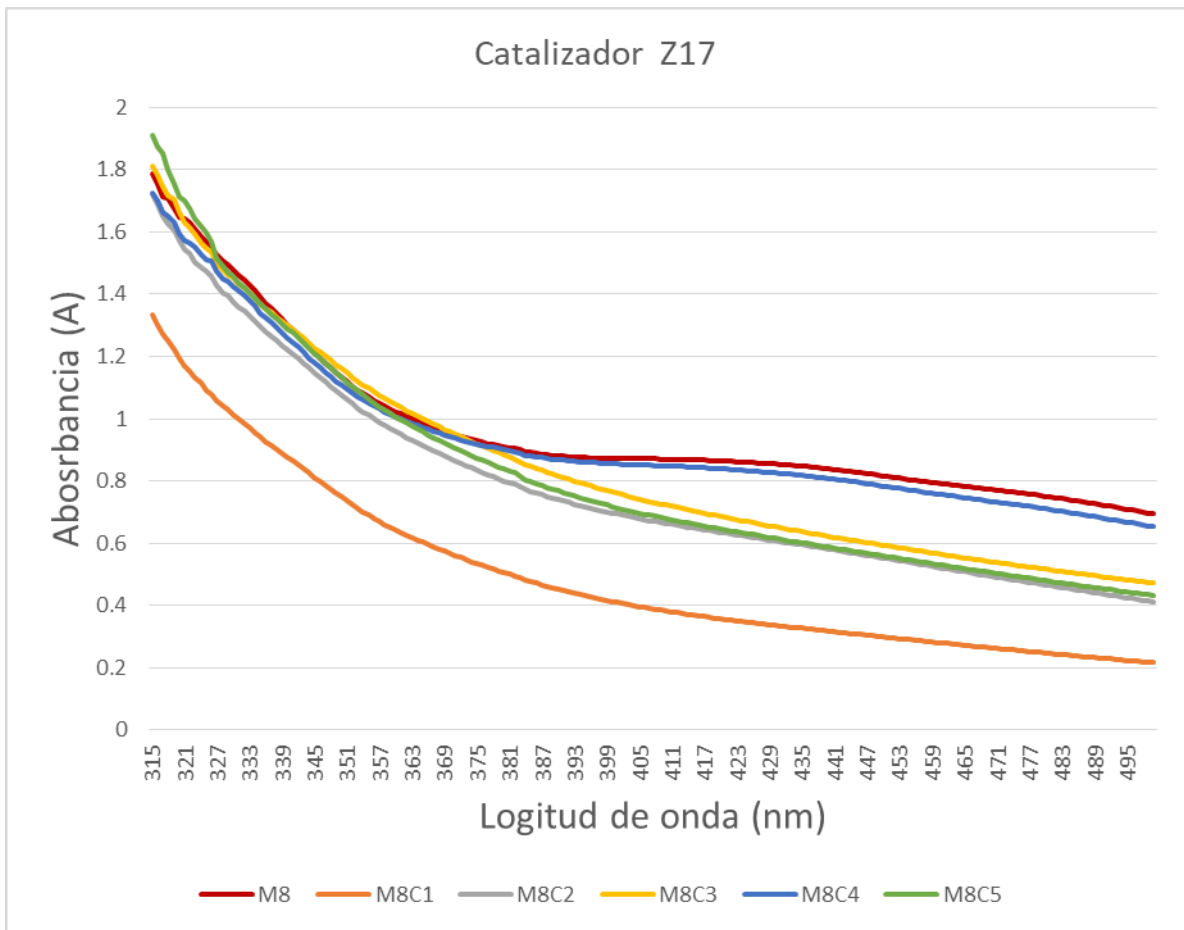


Figura 29. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Z17 con consorcios bacterianos

En el residuo de fotocátalisis de la figura 29 (catalizador Z17), se aprecia que la degradación se realizó en el siguiente orden ascendente 1, 2, 5, 3 y 4, donde el consorcio 1 fue el que tuvo mayor actividad microbiológica, como resultado logró la mejor degradación, en cambio el consorcio 4 obtuvo el menor rendimiento al degradar el residuo incluso en una cantidad mucho menor que los anteriores.

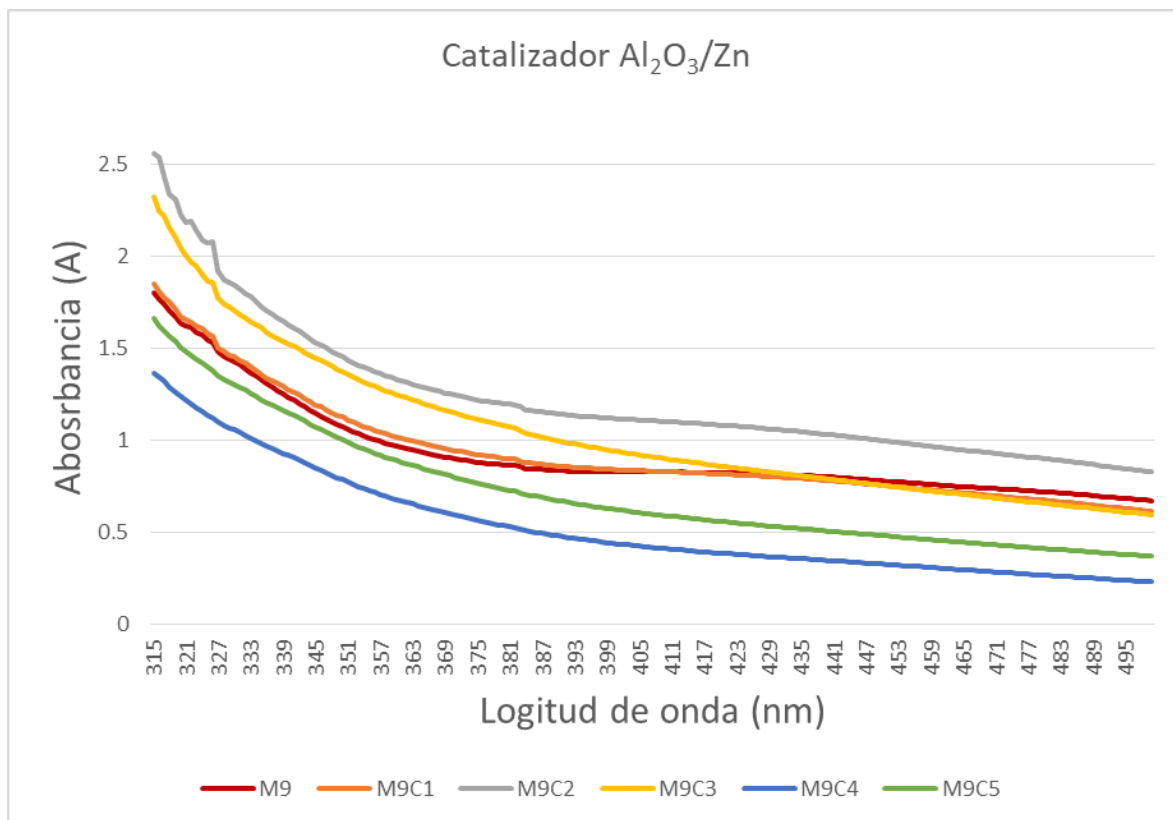


Figura 30. Biodegradación del residuo de fotocátalisis usando el catalizador Al_2O_3/Zn con consorcios bacterianos

En el residuo de fotocátalisis con catalizador Al_2O_3/Zn , la biodegradación para cada consorcio siguió el orden 4, 2, 3, 1 y 2, el consorcio 4 realizó la mejor actividad biodegradativa y 2 la menor, lo cual se puede verificar en la figura 30.

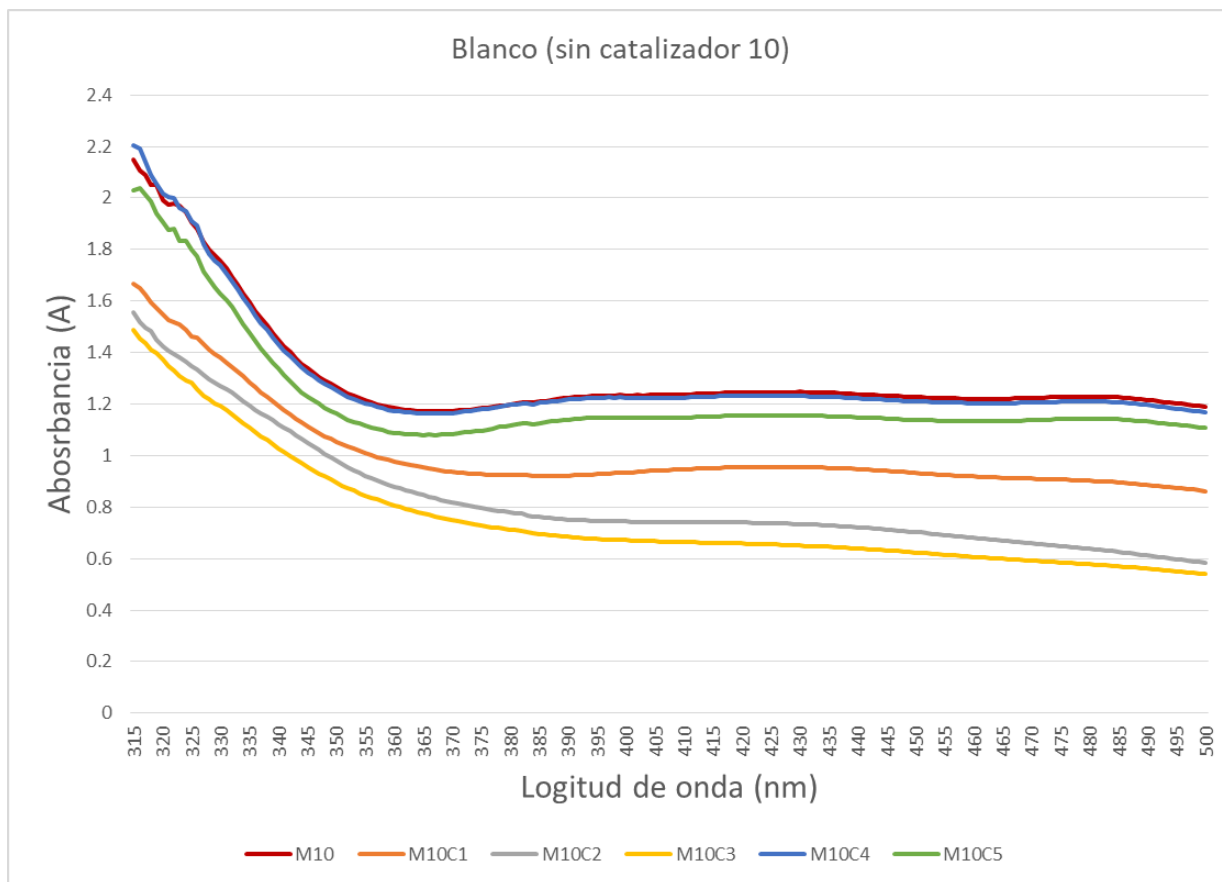


Figura 31. Biodegradación del blanco de fotocatalisis con consorcios bacterianos

Finalmente en la figura 31 que representa la muestra blanco (sin catalizador), se aprecia que todos los consorcios promovieron una acción biodegradativa en el agua, algunos en mayor proporción que otros, la degradación del contenido de colorantes se realizó de manera descendente: 3, 2, 1, 5 y 4; siendo este último el menos efectivo ya que redujo en escasa medida la absorbancia.

7.2 Degradación con catalizadores-consorcios seleccionados.

Pruebas finales

A continuación se muestran dos gráficos que representan los resultados finales del tratamiento de degradación en una segunda etapa después de realizar la fotocatalisis y biodegradación con los catalizadores y consorcios seleccionados a los cuales se les adicionaron nuevas cepas. En ambos gráficos se presenta la absorbancia correspondiente a la muestra sin tratamiento, la degradación del catalizador de erionita que representó el mejor resultado del tratamiento de fotocatalisis, la biodegradación de cada consorcio y el mejor resultado de la combinación de ambos métodos siendo en conjunto con el catalizador Al_2O_3 .

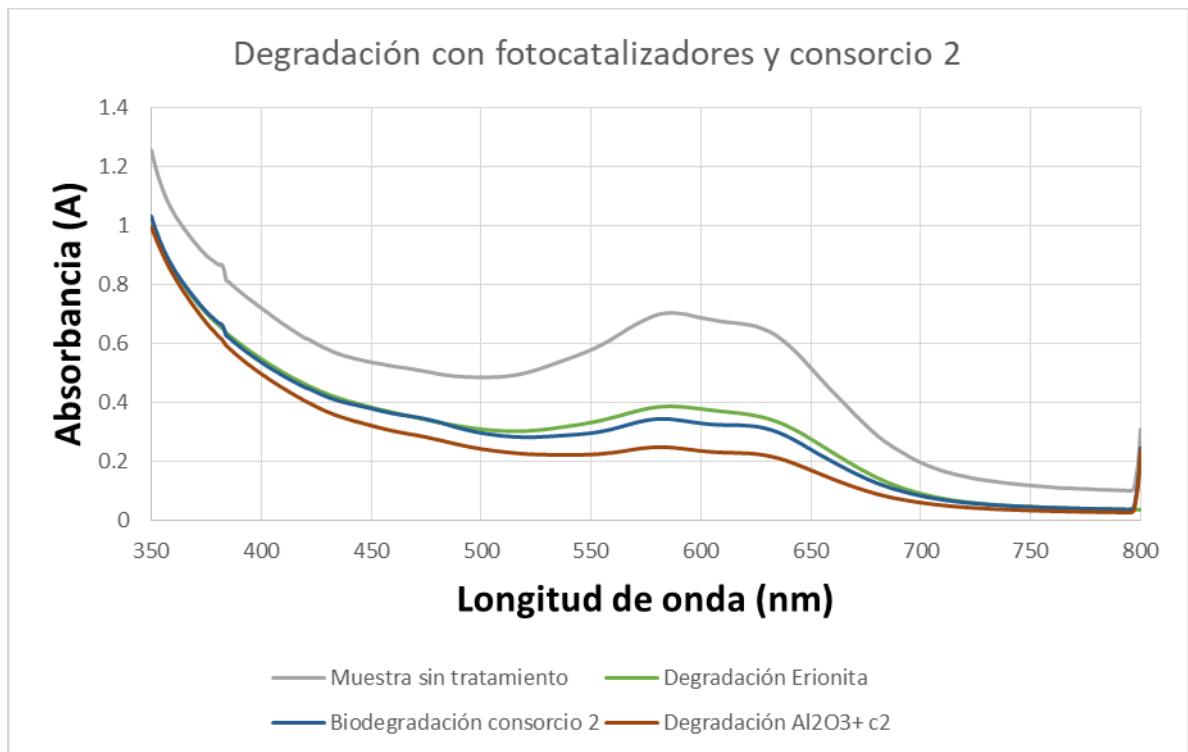


Figura 32. Degradación de agua residual por el conjunto catalizador Al_2O_3 -consorcio 2

La figura 32 muestra el progreso de degradación del agua residual por el consorcio 2 después del tratamiento de fotocatalisis, microbiológico y la combinación de ambos métodos, en el mismo se observa que el mejor conjunto catalizador-microbiológico pertenece al catalizador de Al_2O_3 el cual permitió biodegradar aún más el agua residual.

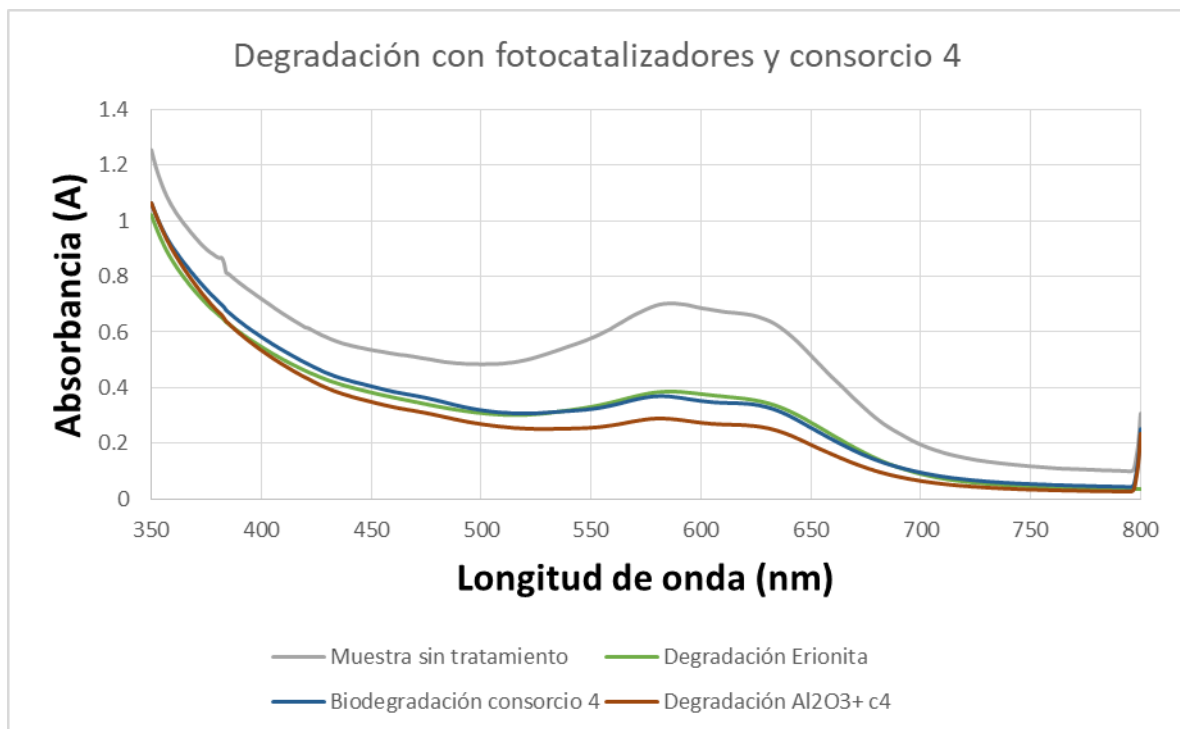


Figura 33. Degradación de agua residual por el conjunto catalizador Al₂O₃-consorcio 4

La figura 33 muestra el progreso del consorcio 4 desde la muestra sin tratamiento, las distintas etapa del tratamiento (fotocatálisis, microbiológico), hasta la última fase del tratamiento fotocatalisis-microbiológico en el que se aplicó el consorcio 4 a los residuos de fotocatalisis resultando como mejor conjunto el de Al₂O₃ que logró degradar en mayor medida el agua residual al igual que el consorcio 2.

8. Discusión de resultados

8.1 Fotocatálisis

La fotocatalisis empleando los 8 catalizadores mostró resultados aceptables en la remoción de colorantes del agua residual en las pruebas preliminares, teniendo el orden de degradación como sigue Al₂O₃/Zn, Al₂O₃, erionita, Z17, SiO₂, Al₂O₃/Z17, SiO₂/erionita y SiO₂/Z17. Igualmente se obtuvieron buenos resultados en la segunda etapa (pruebas finales) donde solo se emplearon aquellos catalizadores que redujeron en mayor cuantía la absorbancia en trabajo conjunto con los 5 consorcios, siendo estos erionita, SiO₂/Z17, SiO₂ y Al₂O₃, de los cuales la erionita fue la que mejor resultado alcanzó en estas pruebas finales.

A pesar de la respuesta conseguida en las pruebas fotocatalítico (preliminar y final) los resultados que se obtuvieron no fueron elevados pues aunque la coloración de las muestras se vio alterada al cambiar de tono, de azul marino a una escala rojizo-café y la absorbancia y la intensidad del color disminuyeron, factores como las condiciones meteorológicas de los días en que se realizó la fotocatalisis, la cantidad de radiación incidente, el periodo en el que se tuvo almacenada la muestra desde las primeras pruebas, la mezcla y cantidad de sustancias que contiene el agua residual así como la falta de un tratamiento que usualmente se llevaría a cabo en una planta de tratamiento previo a la fotocatalisis influyeron en una limitada tasa de degradación, lo cual se evidencio en cada muestra con diferente catalizador pues el color era aún muy visible. Estos son inconvenientes comunes al aplicar la fotocatalisis en un agua residual textil que contiene una gran cantidad de colorantes y productos que se van añadiendo en el proceso de manufacturación de tejidos donde no se conoce el tipo de colorante o colorantes empleados así como el tipo de productos adicionados y su concentración. A diferencia de la fotocatalisis que se enfoca en degradar un colorante en específico conociendo la concentración, el tipo de colorante y la cantidad de radiación (en algunos casos), en el que se suelen obtener tasas de degradación muy altas, la mineralización de colorantes mediante fotocatalisis de un agua residual de una industria textil es más compleja. Lo anterior se ha demostrado en publicaciones sobre fotocatalisis enfocadas en la degradación de colorantes y tintes mediante el uso de distintos catalizadores, las cuales indican que la degradación está sujeta a condiciones como la cantidad de irradiación, el tipo de catalizador y colorante. Forgacs, Cserháti y Oros (2004) también indican que la tasa de fotodegradación depende en gran medida de la estructura química del tinte, un punto muy importante ya que la muestra del agua residual no solo contenía colorantes si no otras sustancias empleadas en el tratamiento y acabado textil. Ante lo anterior algunas publicaciones indican que el uso de procesos fotoquímicos como tratamiento posterior o como procedimiento combinado es una alternativa interesante, principalmente para la aplicación a compuestos muy recalcitrantes (Gomes, Sánches, Duran 1999), tal como sucede en este trabajo pues a pesar de que los resultados de fotocatalisis no fueron elevados esto propició las condiciones para que en la etapa microbiológica la degradación fuera aún mayor.

8.2 Fotocatálisis-Microbiológico

La biodegradación con consorcios bacterianos aplicados en los residuos de fotocatalisis mostró buenos resultados en la mineralización de colorantes, observándose disminución en la absorbancia y cambio de color de las muestras. En las primeras 4 horas de inoculación de los residuos de fotocatalisis de las pruebas preliminares la actividad bacteriana fue notable puesto los tonos de

coloración del agua en algunos residuos de fotocátalisis disminuyó ligeramente, a partir de las 8 horas en adelante hasta las 24 horas fue más que evidente la disminución de las tonalidades y en algunos casos el cambio de tono, quedando en manifiesto que la actividad bacteriana de los consorcios fue efectiva. A diferencia de otros estudios que reportan decoloración después de las 24 horas de incubación, tal es el caso de Ekramul, et al (2018) que inocularon un medio de cultivo que contenía una mezcla de colorantes, con un consorcio formado por bacterias de los géneros *Neisseria sp*, *Vibrio sp*, *Bacillus sp.*, y *Aeromonas sp*. Aisladas de un efluente textil y un suelo contaminado por colorantes, incubando con agitación y tan solo después de 2, 4 y 6 días se mostraron resultados satisfactorios de decoloración.

De acuerdo a los resultados de absorbancia obtenidos en estas pruebas preliminares la mejor biodegradación fue realizada por los consorcios 2 y 4, se determinó que ambos grupos fueron los que mejor trabajaron en conjunto con los catalizadores, en estos consorcios se encuentran los microorganismos pertenecientes a los géneros *Escherichia Coli*, *Pseudomonas putida*, *Serratia*, y *Enterobacter*, *Enterobacter aerogenes* y *Enterobacter hormaechei* que en trabajos anteriores se ha demostrado que estas bacterias han sido efectivas para la degradación de distintos colorantes y contaminantes.

Para las pruebas finales los consorcios 2 y 4, adicionados con otras 4 cepas, también se inocularon en la muestra blanco para observar el comportamiento de los grupos bacterianos sin la aplicación de un tratamiento previo (fotocátalisis), los resultados mostraron una notable reducción de absorbancia incluso mayor que el residuo de erionita obtenido en la fotocátalisis de las pruebas finales, sin embargo, al combinar ambos métodos los resultados obtenidos fueron superiores a los empleados por si solos, siendo el catalizador de Al_2O_3 el que tuvo un mejor efecto en el desempeño de los consorcios, de entre ambos grupos microbianos aplicados el consorcio 2 tuvo un resultado ligeramente mayor que el del consorcio 4.

8. Conclusiones

En la etapa de las pruebas preliminares todos los catalizadores degradaron el agua residual en el orden Al_2O_3/Zn , Al_2O_3 , erionita, Z17, SiO_2 , $Al_2O_3/Z17$, SiO_2 /erionita y $SiO_2/Z17$, esto durante un tiempo de exposición al sol de 6 horas. De esta forma el tratamiento del agua residual mediante fotocátalisis logró la remoción de colorantes, aunque en baja cantidad, se observó disminución de la coloración y la absorbancia del agua, lo cual favoreció la aplicación del tratamiento microbiológico pues el porcentaje de degradación fue bastante mayor con un tiempo de incubación de 24 horas a 30°C, esto

comparado a los métodos individuales los cuales por separado no mostraron la eficiencia adecuada en la degradación de los colorante en el agua residual.

Los conjuntos que obtuvieron mejores efectos para degradar los colorantes del agua en las pruebas preliminares fueron los consorcios 2 y 4 con los catalizadores erionita, $\text{SiO}_2/\text{Z17}$, SiO_2 y Al_2O_3 .

En las pruebas finales en la fase de fotocátalisis el catalizador erionita fue el que obtuvo una mayor degradación para un tiempo de exposición de 8 horas; en la parte microbiológica aplicando solo consorcios 2 y 4 a la muestra sin tratamiento, se obtuvo una degradación mayor a la de erionita. En conjunto el catalizador-consorcio que mejor funciono fue Al_2O_3 - consorcio 2 en condiciones a 30°C y un periodo de incubación de 3 días, logrando un resultado superior al de todas las pruebas individuales.

Con los resultados presentados en este escrito se confirma que a partir de la combinación de ambos métodos fotocátalisis-consorcios es posible degradar un agua residual textil, ya que en conjunto ambas tecnologías lograron disminuir la coloración y absorbancia en mayor cuantía que los métodos individuales.

Es de importancia decir que el sistema de fotocátalisis usa energía solar lo cual contribuye a tener un menor gasto de energía en el proceso y además que sea un sistema amigable con el medio ambiente.

Con la aplicación de esta tecnología se podría disminuir o impedir el vertido de aguas que contienen sustancias toxicas, y que contaminan los cuerpos de agua, así como disminuir el riesgo de contraer enfermedades cancerígenas y mutagénicas causadas por sustancias como colorantes durante exposiciones prolongadas. Por otra parte la mineralización de estas sustancias toxicas disminuiría el daño a la fauna, lo cual traería un gran beneficio para el ecosistema acuático.

9. Bibliografía

1. Anjaneyulu Y., Chary N., Suman D. S. (2005) Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* (2005) 4,245–273. DOI 10.1007/s11157-005-1246-z
2. Ahmad A., Mohd S. H., Sing C., Khatoon A., Wani W. A., Kumar R., y Rafatullah M.(2015) Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater. *RSC Adv* 5, pp (30801-30818). DOI: 10.1039/c4ra16959j
3. Barrios-Ziolo, L., & Gaviria-Restrepo, L., & Agudelo, E. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. *Dyna*, 82 (191), 118-126.
4. Bae J. S., Freeman H. S., y Dong S.(2006) Influences of new azo dyes to the aquatic ecosystem. *Fibers and polymers* 7 (1), pp (30-35).
5. Carbajo J. (2013) Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂ (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Madrid.
6. CEPAL (2018). Cómo se incorpora la sustentabilidad en la industria textil en Latinoamérica. CEPAL - El comercio internacional como incentivo de sustentabilidad 18-19 de julio 2018. Recuperado el día ‘9 de septiembre de 2019 de: http://conferencias.cepal.org/comercio_sostenibilidad2018/Miercoles%2018%20julio/PDF%20FINAL/11%20MARINA%20Adriana.pdf
7. CONAGUA (2007). El agua virtual y la huella hídrica. Recuperado el día 17 de febrero de 2019 de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Infograf%C3%ADa%20Huella%20H%C3%ADdrica.pdf>
8. CONAGUA (2012). El reto hídrico en México. Una carta de navegación. Recuperado el día 12 de febrero de 2019 de:http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/FINAL_ESP.pdf
9. CONAGUA (2015). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento edición 2015. Recuperado el día 22 de septiembre de 2019 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/108998/DSAPAS_2015.pdf
10. CONAGUA (2018). Estadísticas del agua en México 2018. México: SEMARNAT. Recuperado el 12 de febrero de 2019 de: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

11. De la Peña M. E., Ducci J., Zamora V. (2013) Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el día 12 de febrero de 2019 de [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Tratamiento de aguas residuales en Mexico2013.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Tratamiento_de_aguas_residuales_en_Mexico2013.pdf).
12. Ekramul K, Dhar K, Hossain T. (2017) Decolorization of Textile Reactive Dyes by Bacterial Monoculture and Consortium Screened from Textile Dyeing Effluent. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.02.005>
13. EPA (1996) Best Management practices for pollution prevention in the textile industry. Recuperado el 22 de septiembre de 2019 de https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryID=124656
14. Forgacs E., Cserhádi T., Oros G. (2004) Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. Environment International 30, pp (953-971). doi:10.1016/j.envint.2004.02.001
15. Garcés G. L. y Peñuela M. G. (2007). Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. Revista Lasallista de Investigación, 4 (2), 24-31.
16. Gardetti M A, Delgado M L. (2018). Vestir un mundo sostenible: la moda de ser humana en una industria polémica. Buenos Aires, Argentina: LID Editorial Empresarial, S.R.L
17. Gelover S., Montes A. (2013) Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes mediante fotocátalisis heterogénea con TiO₂, empleando luz solar. Recuperado el día 27 de febrero de 2019 de <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1386?show=full>
18. Greenpeace (2012), Hilos tóxicos al desnudo. Greenpeace international. Recuperado el 24 de septiembre de 2019: <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/contaminacion/Hilos-toxicos-mexico.pdf>
19. Gomes S., Sanches R., Durán N. (1999) Degradation and toxicity reduction of textile effluent by combined photocatalytic and ozonation processes. Chemosphere 40, pp (369-373)
20. INEGI (sin fecha). Cuéntame... territorio. Recuperado el día 23 de noviembre de 2019 de: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usuarios.aspx?tema=T>
21. Kant R. (2012) Textile dyeing industry an environmental hazard. Natural science 4 (1), pp (22-26). DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004>
22. Katheresan V., Kansedo J., Yon S., (2018) Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. Journal of environmental chemical engineering 6, pp (4676-4697). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>

23. Lalnunhlimi S., Krishnaswamy V. (2016) Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial Consortium. Brazilian journal of microbiology 47, pp (39-46). Doi:10.1016/j.bjm.2015.11.013
24. Malik A. y Grogmman E. (2012) Environmental Protection strategies for Sustainable Development. DOI 10.1007/978-94-007-1591-2
25. Marcano D. (2018) Introducción a la química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela.
26. McMullan G., Meehan C., Conneely A., Kirby N., Robinson T., Nigam P., Banat L. M., Marchant R. y Smyth W. F. (2001) Microbial decolourisation and degradation of textile dyes. Appl Microbiol Biotechnol 56, pp (81-87). DOI 10.1007/s002530000587
27. Mejía M. P. (2014) Tratamiento de un efluente de la industria textil en biofiltros empacados con turba inoculados con *Pleurotus ostreatus* (Tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, México.
28. Mendoza G. (2009) Decolorización de un efluente de la industria textil mediante el proceso foto-fenton acoplado a un sistema de biofiltración (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
29. Merino L., Velázquez A. (2018). Agenda ambiental 2018 diagnóstico y propuestas. Recuperado de <http://agendaambiental2018.susmai.unam.mx/wp-content/uploads/2018/03/Libro-Merino-Agenda-Amb-UNAM-web.pdf>
30. Miranda E. V. (2018) Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil utilizando peroxidasas de frijol de soya (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
31. Moeller C. G. E., Mijaylova P., Escalante E. V. (2002) Evaluación de alternativas para reúso el agua en tres giros industriales. XXVIII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental. Cancún México.
32. Naciones Unidas (sin fecha). Asuntos que nos importan agua. Recuperado de: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
33. Naciones Unidas (2014). Calidad del Agua. Recuperado de: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
34. Nigam P., Banat I. M., Singh D., y Marchat R., (1995) Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes. Process biochemistry, 31 (5), pp. (435-442)

35. O'Neil C, Hawkes F. R, Hawkes D. L., Lourenc N. D., Pinheiro H. M. y Dele W. (1999) Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 74, pp (1009-1018)
36. Organización Mundial de la Salud (2006) Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. Organización Mundial de la Salud. Vol 1
37. Registro público de derecho del agua REPDA. 2017 Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción (2017). Recuperado el día 24 de febrero de 2019 de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&ver=reporte&o=0&n=nacional>
38. Robison T., McMullan G., Marchant R., y Nigan P. (2001) Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource technology*. 77, pp. (247-255)
39. Rodríguez S., Faccelo J., Toca J. L. (2009) Removal of synthetic dyes by an eco-friendly strategy. *Eng Life Sci* 9 (2), pp(116-123). DOI: 10.1002/elsc.200800088
40. Saldaña F. P., Gómez B. M. A. (2006) Caracterización de fuentes puntuales de contaminación en el río Atoyac, México. XXX Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
41. SEMARNAT (2010). Compendio de estadísticas ambientales 2010. Indicadores de calidad del agua. Recuperado de: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
42. SEMARNAT (2014). Aguas residuales. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html
43. Singh M., Singh H., Kumar D., Singh B., Singh S. (2005) Decolorization of various azo dyes by bacterial consortium. *Dyes and pigments* 67, pp(55-61). doi:10.1016/j.dyepig.2004.10.008
44. Sohrabi M.R. y Ghavami M. (2011), Photocatalytic degradation of Direct Red 23 dye using UV/TiO₂: Effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 153 (3), pp. 1235-1239. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.114
45. UN-United Nations-(2011) Water Quality. Policy brief. Recuperado de: <https://www.unwater.org/publications/un-water-policy-brief-water-quality/>
46. Warshaw J. L. (Eds.)(1998). La industria textil: historia y salud y seguridad. En J. Mager (Ed), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (p. 89.3). España: Ministerio de trabajo y asuntos sociales.