



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“FOTODEGRADACIÓN DE COLORANTES TEXTILES
MEDIANTE LUZ SOLAR Y CATALIZADORES DE
ALUMINIO, SILICIO Y ZEOLITAS”**

TESINA PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

LUIS ALFONSO MARTÍNEZ REYES

Director de Tesis:

Dra. Gabriela Pérez Osorio

Co Director:

Dr. Fernando Hernández Aldana

Puebla, Pue. 2020



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/258/2020
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. LUIS ALFONSO MARTÍNEZ REYES
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

"FOTODEGRADACIÓN DE COLORANTES TEXTILES MEDIANTE LUZ SOLAR Y CATALIZADORES DE ALUMNIO, SILICIO Y ZEOLITAS"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. Gabriela Pérez Osorio
Co-Director de Tesis: Dr. Fernando Hernández Aldana

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 13 de octubre de 2020



M.I.C. Ma. Gpe. Tita Vázquez E. de los Monteros
Secretaría Académica

C.c.p. Directora de Tesis: Dra. Gabriela Pérez Osorio
C.c.p. Co-Directora de Tesis: Dr. Fernando Hernández Aldana
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 329 55 00
Exts. 7250 y 7251.

DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUAP
P R E S E N T E

Por este medio me permito informarle que el pasante de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental Luis Alfonso Martínez Reyes ha concluido el desarrollo y escritura de la tesis titulada:

"FOTODEGRADACIÓN DE COLORANTES TEXTILES MEDIANTE LUZ SOLAR Y CATALIZADORES DE ALUMINIO, SILICIO Y ZEOLITAS"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Bajo la dirección de la Dra. Gabriela Pérez Osorio y co dirección del Dr. Fernando Hernández Aldana.

Se extiende el presente documento para que se inicie el trámite de presentación del coloquio del sustentante.

Sin más por el momento, le reitero mis más sinceras consideraciones.

Atentamente
H. Puebla de Z. a 26 de octubre de 2020



Dra. Gabriela Pérez Osorio
Directora de Tesis
FIQ-BUAP

No dejas de ser un luchador cuando estas lastimado, tu corazón de campeón no cae, tu alma de guerrero no se desvanece... por el contrario, tu fortaleza y coraje brillan y te preparan para volver a la batalla. Esta tesis quiero dedicársela como agradecimiento a aquellas personas que durante este largo camino jamás han dejado de estar a mi lado, brindándome todo su apoyo, confianza y amor incondicional. Por estar ahí para celebrar y más por estar ahí en los fracasos, ayudando a levantarme y dándome más fuerzas. Esta tesis se la dedico a mis padres y a mi novia, por su amor y constante esfuerzo ya que sin ellos no hubiera podido prepararme para la batalla.

AGRADECIMIENTOS

Estoy especialmente agradecido

Con mi familia, por su apoyo, trabajo duro, amor y por ayudarme a cumplir este sueño gracias a sus consejos y confianza.

Con Norma Carrera por apoyarme en los momentos más difíciles, su confianza y su amor incondicional y por demostrarme que hay que luchar por lo que quieres.

Con la Dra. Gabriela Pérez Osorio mi directora de tesis, quien me ofreció todas las posibilidades para lograr terminar esta parte de mis estudios, brindándome su conocimiento y consejos, brindando todo lo necesario para lograrlo.

Al Dr. Fernando Hernández Aldana por todo el apoyo en su laboratorio y todos los buenos consejos.

A los Doctores José Carlos Mendoza y Maribel Castillo por enseñarme tantas cosas que no sabía y por ayudarme a cumplir este sueño.

A mi compañera de laboratorio Elizabeth por su apoyo y compañía.

A mis amigos Carlos y los del equipo de triatlón que no podría terminar de escribir sus nombres que dieron su apoyo, sus consejos y sin duda el haber sido una segunda familia para mí.

A mi entrenador Gerardo Morales por enseñarme la constancia y perseverancia para lograr grandes cosas en el triatlón, la escuela y el trabajo.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a sus maestros por enseñarme todo lo necesario para desarrollar mi tesis brindando todo lo necesario para lograrlo.

Índice

Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas	10
Índice de Gráficas	10
Introducción	12
Justificación	14
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Hipótesis.....	15
Capítulo 1 Antecedentes	16
1.1 El agua.....	17
1.2 La Industria	18
1.3 Industria textil	20
1.3.1 Parámetros físicos, químicos y biológicos.....	22
1.3.2 Procesos de la industria textil	25
1.3.3 Problemática ambiental de la industria textil	27
1.4 Industria del colorante	28
1.5 Colorantes.....	28
1.5.1 Colorantes tipo azo.....	30
1.5.2 Colorantes ácidos	30
1.5.3 Colorantes básicos.....	31
1.5.4 Colorantes azo reactivos	32
1.5.5 Colorantes azo dispersos	32
1.5.5.1 Colorante azul terasil	33
1.5.6 Colorantes azo mordentes	34
1.5.7 Colorantes azo directos	34
1.6 Degradación de colorantes en aguas residuales.....	35
1.6.1 Tratamiento de aguas residuales	35
1.6.2 Tratamientos fisicoquímicos	37
1.6.3 Coagulación y Floculación	38
1.6.4 Tratamientos biológicos.....	39
1.6.4.1 Procesos anaerobios	39
1.6.4.2 Decoloración aerobia por bacterias.....	40

1.7 Degradación de colorantes mediante procesos avanzados	41
1.7.1 Ósmosis inversa.....	41
1.7.2 Tratamiento con ozono.....	42
1.7.3 Tratamiento con cloro	42
1.7.4 Tratamiento por adsorción	42
1.7.5 Procesos Avanzados de Oxidación	43
1.7.5.1 UV/H ₂ O ₂	45
1.7.5.2 Foto-Fentón.....	45
1.7.5.3 Fotocatálisis Heterogénea.....	46
1.8 Semiconductores.....	48
1.9 Proceso Sol-Gel	50
Capítulo 2 Metodología.....	52
2.1 Síntesis de los óxidos mixtos de aluminio y silicio por el método Sol-Gel.....	53
2.2 Análisis de composición química elemental	58
2.3 Pruebas fotocatalíticas de degradación con colector solar y prueba de oscuridad.....	58
2.4 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos	60
2.4.1 Mantenimiento de cepas	60
2.4.2 Biodegradación de las muestras de residuos de fotocatalisis del colorante azul terasil y muestra textil.....	61
2.5 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul terasil y muestra textil mediante espectrofotometría UV-Visible	61
Capítulo 3 Resultados y discusión.....	63
3.1 Composición química elemental de los catalizadores.....	64
3.2 Pruebas de fotocatalisis con el colector solar.....	65
3.3 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul terasil mediante espectroscopía UV-Visible	70
3.4 Determinación del porcentaje de biodegradación después de la fotocatalisis	74
3.5 Evaluación del porcentaje de degradación de la muestra textil mediante espectrofotometría UV-Visible	78
3.6 Crecimiento de los microorganismos para formar los consorcios bacterianos.	82
3.7 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos	83
Conclusiones.....	94
Bibliografía	98

Índice de Figuras

Figura 1 Procesos de fabricación dentro de la Industria Textil	26
Figura 2 Fórmula química de los compuestos azo.	30
Figura 3 Colorante rojo ácido 151 (Kirk-Othmer, 1993).....	31
Figura 4 Color Azo Naranja Básico 1 (Kirk-Othmer, 1993).	31
Figura 5 Estructura del colorante negro reactivo 5 (Kirk-Othmer, 1993).	32
Figura 6 Estructura del colorante azul disperso 79 (Kirk-Othmer, 1993).....	33
Figura 7 Fórmula química del colorante azul terasil.	34
Figura 8 Estructura del colorante Azo Amarillo Mordante 1 metalizado.....	34
Figura 9 Estructura del colorante azul directo 2 (Piña Mondragon2017).....	35
Figura 10 Proceso de coagulación- floculación (según SSWM).	39
Figura 11 Esquema de filtración de ósmosis inversa	42
Figura 12 Proceso de fotocatalisis heterogénea con un semiconductor.	48
Figura 13 Análisis FODA de la fotocatalisis heterogénea.....	48
Figura 14 Proceso Sol-Gel (Masuda et al.).	51
Figura 15 Diagrama de flujo de la síntesis de óxidos de silicio y aluminio con y sin zeolitas naturales.....	54
Figura 16 Mecanismo para la preparación de los catalizadores por Sol-Gel.	55
Figura 17 Sistema de secado en la preparación de los catalizadores.	55
Figura 18 Dióxido de Titanio (TiO ₂).	56
Figura 19 Dióxido de Silicio (SiO ₂).	56
Figura 20 Clinoptilolita.	56
Figura 21 Erionita.....	57
Figura 22 Alúmina (Al ₂ O ₃).	57
Figura 23 SiO ₂ -Clinoptilolita.....	57
Figura 24 SiO ₂ -Erionita.	57
Figura 25 Equipo JEOL JSM-6610 LV utilizado para la composición química elemental de los catalizadores.....	58
Figura 26 Colector solar utilizado para la fotocatalisis	66
Figura 27 Alícuotas del TiO ₂ después de la fotocatalisis para el colorante AT.	68
Figura 28 Alícuotas para SiO ₂ Clinoptilolita después de la fotocatalisis para el colorante AT.	68
Figura 29 Alícuotas para la Erionita después de la fotocatalisis para el colorante AT.....	68
Figura 30 Alícuotas para Al ₂ O ₃ después de la fotocatalisis para el colorante AT	69
Figura 31 Alícuotas para la erionita después de la fotocatalisis de la muestra textil.	69
Figura 32 Alícuotas para el SiO ₂ después de la fotocatalisis de la muestra textil.....	69
Figura 33 Alícuotas para la Clinoptilolita después de la fotocatalisis de la muestra textil.	69
Figura 34 Alícuotas para Al ₂ O ₃ después de la fotocatalisis para la muestra textil.	70

Índice de Tablas

Tabla 1 Cantidad de agua generada y su concentración de colorante en las diferentes industrias (recuperado de M.V. Rodríguez et al. 2009).	19
Tabla 2 Procesos de producción de la industria textil (Kuhad et al., 2004).	20
Tabla 3 Sustancias químicas encontradas en las aguas residuales textiles biológicos (modificada de Anjaneyulu et al., 2005).	21
Tabla 4 Parámetros físicos, químicos y biológicos (recopilada por cuenta propia).	23
Tabla 5 Parámetros característicos de efluentes textiles (Buscio et al. 2015).	27
Tabla 6 Clasificación de los colorantes por grupo funcional y uso en los procesos (recopilada por cuenta propia).	29
Tabla 7 Ventajas y desventajas de los procesos de biomasa más utilizados (elaboración propia)..	36
Tabla 8 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (elaboración propia).	44
Tabla 9 Muestras a ser utilizadas en la prueba de fotocatalisis.	58
Tabla 10 Composición química elemental de los catalizadores, expresada en % en peso (elaboración propia).	65
Tabla 11 Descripción de las alícuotas tomadas durante el experimento de fotocatalisis.	66
Tabla 12 Nomenclatura utilizada para las alícuotas con el catalizador correspondiente	67
Tabla 13 Bacterias utilizadas para realizar los consorcios bacterianos.	83
Tabla 14 Formación de los consorcios bacterianos utilizados en la biodegradación.	83
Tabla 15 Nomenclatura de las pruebas de biodegradación.	84

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Absorbancia de los catalizadores después de las 24 h de oscuridad	71
Gráfica 2 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO_2	71
Gráfica 3 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con TiO_2	71
Gráfica 4 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO_2 Erionita.	72
Gráfica 5 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Erionita	72
Gráfica 6 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO_2 con Clinoptilolita.	72
Gráfica 7 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Clinoptilolita	73
Gráfica 8 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Al_2O_3	73
Gráfica 9 Espectro UV-VIS del blanco del colorante azul terasil.	73
Gráfica 10 Curva de calibración del colorante azul terasil	75
Gráfica 11 % Degradación para el colorante azul terasil con cada catalizador	77
Gráfica 12 Prueba de oscuridad para la muestra textil con los 7 catalizadores	78
Gráfica 13 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO_2	79
Gráfica 14 Espectro UV-VIS de la muestra textil con TiO_2	80
Gráfica 15 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO_2 -Erionita.	80
Gráfica 16 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Erionita	80
Gráfica 17 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO_2 Clinoptilolita	81
Gráfica 18 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Clinoptilolita	81
Gráfica 19 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Al_2O_3	81

Gráfica 20 Espectro UV-VIS de la muestra textil (blanco)	82
Gráfica 21 % Degradación de color de la muestra textil por medio de Fotocatálisis heterogénea .	82
Gráfica 22 Concentración del colorante AT con SiO ₂ después de la biodegradación.....	86
Gráfica 23 Concentración del colorante AT con nTiO ₂ después de la biodegradación.....	86
Gráfica 24 Concentración del colorante AT con SiO ₂ -Erionita después de la biodegradación.....	86
Gráfica 25 Concentración del colorante AT con erionita después de la biodegradación.	87
Gráfica 26 Concentración del colorante azul terasil con SiO ₂ -clinoptilolita después de la biodegradación.....	87
Gráfica 27 Concentración del colorante azul terasil con Clinoptilolita después de la biodegradación.	87
Gráfica 28 Concentración del colorante azul terasil con Al ₂ O ₃ después de la biodegradación.....	88
Gráfica 29 Concentración del blanco de la fotocatalisis del colorante azul terasil de la posterior degradación bacteriana.....	88
Gráfica 30 Concentración del blanco de biodegradación.	88
Gráfica 31 Concentración de la muestra textil con SiO ₂ después de la biodegradación.	89
Gráfica 32 Concentración de la muestra textil con TiO ₂ después de la biodegradación.	90
Gráfica 33 Concentración de la muestra textil con SiO ₂ -erionita después de la biodegradación.	90
Gráfica 34 Concentración de la muestra textil con erionita después de la biodegradación.....	90
Gráfica 35 Concentración de la muestra textil con SiO ₂ -clinoptilolita después de la biodegradación.	91
Gráfica 36 Concentración de la muestra textil con clinoptilolita después de la biodegradación. ...	91
Gráfica 37 Concentración de la muestra textil con Al ₂ O ₃ después de la biodegradación.....	91
Gráfica 38 Concentración del blanco de la fotocatalisis de la muestra textil después de la biodegradación.	92
Gráfica 39 Concentración de la muestra textil del blanco de biodegradación después de la prueba de degradación microbiana.....	92

Introducción

Actualmente el agua es un recurso natural utilizado para satisfacer las necesidades básicas e industriales del hombre, en México 70% de los cuerpos de agua tienen cierto grado de contaminación y cerca de 260 sitios considerados como fuertemente contaminados y otros con menor contaminación. En la actualidad se producen cerca de 14,000 millones de m³/año de aguas residuales en México y un poco más de la mitad es tratada, la cual es transportada a ríos, mares, lagos e incluso a riego. Alrededor del 19% de agua residuales descargadas se debe a fuentes industriales además de utilizar para sus procesos un 7.1% del agua que se consumen para usos consuntivos (CONAGUA, 2019). Dentro del ámbito industrial muchos procesos contribuyen al deterioro de las aguas, dentro de los cuales se presentan muchos químicos sintéticos que tardan mucho tiempo en degradarse, una de estas sustancias son los colorantes, utilizados para impartir color a variedad de materiales.

La cantidad de agua utilizada en los procesos textiles varía dependiendo de proceso específico y el equipamiento utilizado en la planta. En el teñido con colorantes dispersos se utilizan de 100 a 150 litros de agua por kilogramo de producto, lo cual nos indica el elevado consumo de agua en la Industria Textil, además de contener grandes cantidades de colorantes en las aguas de desecho se encuentran de igual forma grasas y aceites, compuestos sulfonados, solventes, metales pesados, sales inorgánicas, fibras y otros compuestos.

La presencia de colorantes en el agua representa un reto debido a que este tipo de compuestos se consideran como contaminantes persistentes que no pueden removerse con métodos convencionales de tratamiento de aguas, debido a que presentan estructuras complejas y a su origen sintético, se ha demostrado que ciertos colorantes son carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación presentan aun una mayor toxicidad (Saratale et. al., 2011). Los colorantes de tipo azo son los más utilizados comercialmente y son caracterizados por el doble enlace nitrógeno con nitrógeno (-N=N-) y contienen

normalmente entre uno y cuatro grupos azo, los cuales están unidos a dos radicales de los cuales pueden ser aromáticos.

Existen varios métodos de degradación de colorantes entre los que se encuentran los biológicos por medio de bacterias y sus enzimas, que son muy utilizados debido a que es económicamente factible, además de obtenerse buenos resultados en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Carbono Orgánico Total (COT), los físicos como la adsorción con carbón activado y los químicos como la fotocatalisis con diversos óxidos como los catalizadores. Dentro de los procesos fisicoquímicos se encuentran los Procesos de Oxidación Avanzada (PAOs), como el Fentón, Foto - Fentón, Fotocatalíticas, Electro – Fentón, Oxidación por aire húmedo, ozonización y otros de los cuales se obtienen buenos resultados en decoloración de las aguas, remoción del COT y mineralización.

La fotocatalisis con óxidos mixtos destruye los dobles enlaces asociados con los colorantes, por lo cual la decoloración ocurre en un lapso no tan prolongado como en los biológicos, se utiliza la luz solar y la presencia de catalizadores para degradar la materia orgánica y reducir el color y la DQO.

La evidencia que existe acerca del uso de óxidos en pruebas fotocatalíticas es amplia hablando sobre el TiO_2 , es por lo que se buscan nuevos catalizadores que sean capaces de mejorar las dificultades que presenta el uso del dióxido de titanio y encontrar una buena alternativa para obtener agua sin color, con menor cantidad de materia orgánica y mejores resultados económicos y ecológicos. Para obtener un mejor resultado se propuso la degradación por medio de fotocatalisis con óxidos mixtos y luz solar, seguido de degradación biológica con 5 consorcios bacterianos.

Justificación

Este estudio es realizado para evaluar la degradación de colorantes tipo azul en agua mediante fotocatalisis utilizando óxidos mixtos de aluminio y silicio con luz solar; la síntesis de óxidos mixtos por medio del método sol-gel, el cual es considerado como uno de los métodos más prometedores gracias a que se obtienen polvos con mucha pureza y con altas áreas superficiales.

Los óxidos mixtos han sido usados en aplicaciones fotocatalíticas para tratamiento de aguas residuales para la conversión de sustancias químicas perjudiciales para el medio ambiente, el TiO_2 ha sido un catalizador excepcional debido a su baja toxicidad, alta superficie de adsorción, por ser económico y por su estabilidad (Carvajal, 2011), pero la cantidad usada para realizar la fotocatalisis es alta lo que produce cierta turbidez lo cual ocasiona que no penetre la luz UV necesaria para la fotocatalisis, ciertamente el problema de la cantidad utilizada genera otra problemática derivada de la filtración de las partículas de TiO_2 del agua a tratar y otro problema general de este material es que su reciclado es difícil y nada rentable (García, N. 2015), por lo que es necesario encontrar alternativas al uso del TiO_2 , el uso de óxidos mixtos de aluminio y silicio tienen un menor costo de producción y tienen una buena eficiencia, alta actividad catalítica así como gran estabilidad mecánica y térmica, además junto con el uso de la radiación solar ayuda a reducir el costo de este proceso debido a que no se necesitan lámparas ni energía mecánica o eléctrica (Llano *et al.*, 2007). Esta investigación tiene el fin de demostrar que la degradación de colorantes en agua mediante fotocatalisis con el uso de óxidos mixtos de aluminio, silicio y zeolitas es un recurso novedoso para obtener un gran rendimiento en la degradación de contaminantes en el agua, teniendo un enfoque en el desarrollo de materiales semiconductores, que mediante la luz solar logren ser irradiados para tener la capacidad de degradar contaminantes orgánicos en el agua para complementar este proceso se realiza un proceso de biodegradación con consorcios bacterianos que son capaces de degradar los residuos de colorantes que permanecen después de la fotocatalisis.

Objetivo General

Evaluar la degradación del colorante azul terasil (AT) en agua mediante fotocátalisis utilizando óxidos mixtos de aluminio, silicio y zeolitas con luz solar, seguido de una biodegradación bacteriana.

Objetivos Específicos

- a) Sintetizar los catalizadores por el método sol gel: Al_2O_3 (alúmina), SiO_2 (óxido de silicio) y sus combinaciones con las zeolitas Erionita y Clinoptilolita.
- b) Realizar las pruebas fotocatalíticas con los catalizadores sintetizados y radiación solar, en un colector solar acoplado a un sistema de enfriamiento y de aireación.
- c) Desarrollar las pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos.
- d) Evaluar el porcentaje de degradación del colorante azul terasil (AT) y una muestra de agua residual textil (MT), mediante espectrofotometría UV-Visible.
- e) Determinar su composición química elemental.

Hipótesis

La combinación de procesos fisicoquímicos como la fotocátalisis, con procesos microbiológicos como la degradación bacteriana, permiten tener un mayor porcentaje de degradación del colorante azul terasil en agua.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 El agua

El agua es un compuesto químico muy abundante en la biosfera terrestre y quizás una de los más importantes ya que es utilizada en el metabolismo de casi todos los seres vivos y entonces es comprensible que sin agua no hay vida.

Este recurso es esencial en la tierra y en todo lo que sucede y es por eso que se encuentra en forma tan abundante y en diferentes fases en constante cambio como en los nevados, en ríos, lagunas y océanos, todos estos para sustentar la naturaleza y todos sus ecosistemas, así como para todas las actividades productivas del ser humano.

Ya que este tan apreciado recurso se ocupa de tantas formas, su deterioro es lógico y para comprenderlo es necesario conocer el ciclo hidrológico, así como los efectos del desarrollo humano en él. En este proceso natural participan procesos como la lluvia, formación de nubes, el viento, la temperatura, entre otros; existen dos zonas de mantenimiento dentro del ciclo, la primera es la zona de recarga donde se distinguen la condensación, la precipitación, la infiltración y la percolación, en la segunda o zona de descarga participan la evaporación, evapotranspiración y la escorrentía. Este proceso es afectado por desbalances naturales como erupciones volcánicas, pero la participación del ser humano es también un factor importante.

El agua dulce es un recurso finito, imperativo para el desarrollo sostenible, el crecimiento económico, la estabilidad política y social, la salud y la erradicación de la pobreza y en los últimos años la demanda mundial de este líquido ha ido creciendo.

Muchos asentamientos humanos fueron ubicados a orillas de corrientes de agua para utilizar dicho líquido para las actividades acostumbradas, pero también asentamientos industriales comenzaron a ubicarse en colindancias de estos para verter todos los residuos de sus procesos, lo que trae como consecuencia la contaminación de fuentes de agua y por consiguiente la pérdida de calidad en grandes volúmenes de agua.

En el agua se pueden encontrar agentes contaminantes que es toda forma de materia o energía, sustancia o sus combinaciones, compuestos o derivados químicos y biológicos que al entrar en contacto con el agua altera o modifica su composición y condiciona el equilibrio de su estado normal y estos agentes pueden ser naturales o antropogénicos; la contaminación consiste, básicamente, en la generación de residuos en un medio que se introducen por encima de la capacidad de este para eliminarlos. La proliferación de estos residuos supone un desequilibrio grave en el biosistema hasta llegar a imposibilitar la vida de las especies existentes.

Se considera como agua contaminada cuando no es apta para el consumo humano o sus actividades, cuando los animales acuáticos no pueden vivir en ella o cuando no puede destinarse a aplicación industrial alguna (CONAGUA 2019).

1.2 La Industria

La industria desempeña una función crucial en el desarrollo social y económico de un país. Desde sus inicios hasta la actualidad ha tenido el fin de transformar los recursos naturales en productos necesarios para satisfacer necesidades, diversificando los patrones de consumo, introduciendo nuevas necesidades y es por eso su uso íntimamente ligado a la tecnología lo que hace obtener una productividad eficiente y rentable, teniendo también como consecuencias producciones más rápidas, optimización de tiempo y espacio, factores humanos como la higiene y seguridad o ergonomía, así como el comportamiento organizacional y desarrollar procesos más amigables con el medio ambiente. El progreso económico de una nación depende en gran medida a su riqueza natural y los medios para transformarlos, es por lo que se tiene que mantener el equilibrio entre los recursos y la producción de bienes. La industria no solo genera recursos y bienes, también conlleva a la generación de desechos sólidos, líquidos y gaseosos hacia el medio ambiente, es por lo que se tienen que reducir los impactos ayudados por la normatividad que solo constituye un complemento para fiscalizar y controlar, por lo que, en sí, solas son insuficientes es por ello por lo que

se utilizan los nuevos métodos tecnológicos y el cuidado ambiental que se tenga en cada industria es una fuente de competitividad y ahorro.

Dado el consumo de los bienes y el crecimiento de la población es necesario el crecimiento de la industria en todos los ámbitos y con su crecimiento implica producir mayores impactos y consumo de recursos. Muchas industrias como la azucarera, presenta efectos contaminantes sobre el agua derivados por el elevado consumo energético, sus descargas de alta temperatura y gran contenido de materia orgánica, además de contribuir a la contaminación del aire debido al uso de combustóleo y bagazo; la industria minero-cuprífera ocasiona efectos contaminantes en el agua debido a las descargas ácidas, de metales, cianuros de sodio y otros materiales reactivos; la industria siderúrgica afecta al agua con sus descargas ácidas y amoniacales; la industria petrolera ocasiona la mayor generación de contaminantes liberados a la atmosfera y a las aguas que afectan drásticamente al ambiente; la industria química de igual forma ocasiona grandes emisiones de contaminantes al aire por solventes y descargas de aguas residuales con sustancias toxicas; los principales problemas ambientales medioambientales ocasionados por la industria textil están relacionados con las sustancias contaminantes liberadas a la atmosfera y las aguas residuales (Tabla 1).

Tabla 1 Cantidad de agua generada y su concentración de colorante en las diferentes industrias (recuperado de M.V. Rodríguez et al. 2009).

Industria	Cantidad de agua generada (m ³ /Ton)	Concentración de color (unidades Hazen)
Azucarera	0.4 m ³ /Ton caña triturada	150-200
Cervecería	0.25 m ³ /Ton cerveza producida	200-300
Destilería	12 m ³ / Ton de alcohol producido	200-300
Curtido	28 m ³ /Ton de piel	400-500
Pulpa y papel	175 m ³ /Ton de papel	100-600
Textil	120 m ³ /Ton de fibra	1100-1300

1.3 Industria Textil

La industria textil en la actualidad es una de las industrias con mayor crecimiento debido a la demanda de los productos realizados, abarca una amplia gama de procesos, como el punto, el anudado, el enfurtido, así como el hilado a partir de fibras sintéticas o naturales, el acabado y la tinción de tejidos. La industria textil está constituida por sectores diferentes, aunque interrelacionados que producen una serie de productos, desde fibras clasificadas como vegetales, animales y sintéticas, hasta productos del hogar, en el que cada sector se puede considerar como una industria por separado aun sabiendo que el producto obtenido en cada etapa de la producción constituye el principal insumo de materia prima para el siguiente, y se pueden considerar nueve categorías principales, pueden observarse en la Tabla 2 (Kuhad *et al.*, 2004; Dos Santos *et al.*, 2007).

Tabla 2 Procesos de producción de la Industria Textil (Kuhad *et al.*, 2004).

Tipo de Industria	Tipo de Industria
Fibras artificiales	Tejidos y productos de punto
Tejidos planos de algodón, lana o fibras sintéticas	Fibras naturales (algodón, lana, seda, lino, etc.)
Fieltros y tejidos industriales	Revestimientos para piso
Productos para el hogar (frazadas, toallas, etc.)	Textiles no tejidos (servilletas, pañales, etc.)
Cuerdas sogas y bramantes	

La industria textil mexicana se caracteriza por el alto volumen de agua que usa en sus procesos, la cual es contaminada durante la producción de hilos o telas. En el 2003 cerca de 2,500 establecimientos textiles existentes generaron 0.7 m³ /s de aguas residuales y produjeron 14 mil toneladas de DBO (CNA, 2004). Para el mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos y uso racional del agua se requiere, sustituir materias primas, utilizar equipos de proceso más eficiente y poder involucrar la reutilización del agua tratada en servicios y procesos donde se requiera agua con calidad inferior a la potable (Cruz, 2003). Debido al gran consumo de productos químicos el sector textil es uno de los principales

generadores de contaminantes que se vierten al agua. Esta industria utiliza una gran variedad de sustancias químicas en toda su cadena de producción que contaminan el agua de sus procesos, generando agua residual donde los contaminantes son extremadamente diversos y varían de acuerdo con el tipo de fibra, hilo o tela, proceso o productos químicos usados, además que sus aguas residuales contienen diferentes contaminantes muy persistentes en el medio marino y bioacumulativos que las vuelven muy tóxicas y pueden afectar negativamente de igual forma la salud humana, la fauna y el medio ambiente (Tabla 3). Los efluentes de la industria textil se caracterizan por fluctuaciones extremas en parámetros físicos, químicos y biológicos (Anjaneyulu *et al.*, 2005).

Tabla 3 Sustancias químicas encontradas en las aguas residuales textiles (modificada de Anjaneyulu *et al.*, 2005).

Sustancia Química	Uso	Toxicidad
Anilinas cloradas	Relación con el uso de tintes y su fijación en las telas.	Sustancia tóxica en el medio acuático, puede ser considerada como un compuesto carcinógeno.
PFOA (ácido perfluorooctanoico)	Derivada del uso de sustancias químicas perfluoradas en la fabricación de textiles.	Sustancia bioacumulativa y altamente persistente en el medio marino.
Nitrobenceno y cloronitrobenceno (CNB)	Utilizados en la producción de tintes.	Carcinogénico para animales e incluso para humanos.
Alquifenoles	Procesos de lavado y tenido.	Tóxicos para la vida acuática y bioacumulativos en los tejidos corporales.
Retardantes de llama bromados y clorados	Utilizados en la industria textil para reducir la inflamabilidad del producto.	Sustancias persistentes y bioacumulativas, en el humano es capaz de interferir en los sistemas hormonales.
Compuestos organoestánicos	Se utiliza para prevenir el mal olor causado por el sudor.	Puede acumularse en el cuerpo y afectar a los sistemas inmunológico y reproductivo.

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental para la gestión de la calidad medioambiental y tratamiento de las aguas residuales, es por lo que es necesario conocer las diferentes características (ST, CO, pH, DBO, DQO, entre otros), así como conocer su funcionamiento y como afectan estos al medio ambiente (R. Vilanova *et al.*, 2017).

1.3.1 Parámetros físicos, químicos y biológicos

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad, que nos van a servir para montar un buen sistema de pretratamiento de aguas residuales.

En cuanto a las características químicas se requiere hablar más sobre la materia orgánica y su medición con DBO₅ y DQO y OD, así como de la materia inorgánica presente en las aguas residuales, como grasas y aceites, agentes tensoactivos, pesticidas, metales pesados, pH. Estos parámetros nos ayudan a conocer cómo se comporta químicamente el agua así formar un buen tratamiento secundario de aguas residuales.

La medición de las características biológicas del agua sirve como indicador y para determinar la toxicidad del agua, estas características biológicas son importantes ya que nos muestran los organismos presentes tanto en aguas residuales como superficiales, estos organismos se clasifican en eucariotas, eubacterias y arqueobacterias, la mayoría de los organismos pertenecen al grupo de las eubacterias. La categoría protista, dentro de los organismos eucariotas, incluye las algas, los hongos y los protozoos. Las plantas tales como los helechos, los musgos, las plantas hepáticas y las plantas de semilla están clasificadas como eucariotas multicelulares. Los vertebrados y los invertebrados están clasificados como animales eucariotas multicelulares. Los virus, también presentes en el agua residual, se clasifican en función del sujeto infectado. Y con estos últimos

parámetros poder tener un sistema de tratamiento terciario y de desinfección que ayude a eliminar cualquiera de estos organismos presentes en el agua. Todas las características físicas, químicas y biológicas se encuentran enumeradas y explicadas en la Tabla 4 para el mejor entendimiento de estos parámetros (Samboni *et al.* 2007).

Tabla 4 Parámetros físicos, químicos y biológicos (recopilada por cuenta propia).

Parámetro	Características	Definición
Físicos	Color	Utilizado para describir un agua residual como gris, gris oscuro o negro.
	Turbiedad	Mide las propiedades de transmisión de la luz a través del agua, indica la calidad de las aguas con relación a la materia coloidal y en suspensión.
	Densidad	De esta depende la formación de fangos y se define como la masa por unidad de volumen.
	Temperatura	La temperatura del agua suele ser más elevada que la del suministro debido a la incorporación de agua caliente debido a los procesos industriales. Este parámetro es muy importante debido a su influencia con el medio acuático, así como con las reacciones químicas y su velocidad.
	Olor	Normalmente se debe a los gases liberados por la descomposición de la materia orgánica.
	Sólidos Totales	Se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación, (los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica en un tiempo de 60 minutos; también se clasifican en filtrables y no filtrables (sólidos en suspensión), en el cual se utiliza la filtración con un tamaño de poro de 1-2 micrómetros, la fracción filtrable corresponde a sólidos coloidales (moléculas entre 0.001 y 1 micrómetro) y disueltos (moléculas orgánicas e inorgánicas iones en disolución en el agua), así mismo todos estos sólidos suelen dividirse en volátiles y no volátiles).
Químicos	Materia Orgánica	Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También

	<p>pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites, así como moléculas orgánicas sintéticas.</p>
	<p>Métodos para medir la materia orgánica del agua</p> <p>La Demanda Química de Oxígeno; Es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales.</p> <p>La Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua. Normalmente se emplea la DBO₅, que mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días. Resulta el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado. La determinación de este está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.</p> <p>Carbono orgánico total (COT). Otro método para medir la materia orgánica presente en el agua es el método COT, especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica.</p>
Materia Inorgánica	<p>Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales que tienen importancia para la determinación y control de la calidad del agua, como lo son los cloruros, la alcalinidad, las formas del nitrógeno, el fósforo, el azufre y metales pesados.</p>

		pH	La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia puesto que el intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico.
Biológicas	Uso de organismos indicadores		Se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, puesto que su presencia es más numerosa y fácil de comprobar.

1.3.2 Procesos de la Industria Textil

Debido a los diferentes procesos en la industria textil se obtienen aguas residuales con diferentes contaminantes, es muy variable, típicamente caliente, alcalino y coloreado. Los principales contaminantes presentes son sólidos suspendidos, aceites minerales y compuestos orgánicos y son mostrados en sus diferentes etapas en la Figura 1, los cuales se consideran compuestos xenobióticos recalcitrantes a los procesos de biodegradación. También están presentes concentraciones significativas de metales pesados, como cromo, cobre, zinc, níquel o plomo. En el proceso de fabricación de la fibra natural, el agua residual puede contener pesticidas y contaminantes microbiológicos, como bacterias, hongos y otros patógenos.

Durante el proceso de encolado se urde el hilo y una vez urdido atraviesa una batea con productos químicos a alta temperatura para brindarle al hilo consistencia, elasticidad y suavidad.

En el proceso de lavado textil se tiene una serie de etapas, de las cuales se consideran dos tipos fundamentales que son los procesos simples los cuales no deben ser procesados una segunda ocasión y los principales procesos son el desgomado, teñido, fijado, coloreado, neutralizado, suavizado, entre otros; los procesos dobles requieren un proceso adicional (estonado, focalizado, fronceado y con arrugas) al finalizar la primera etapa.

Durante el proceso de blanqueado se decoloran las fibras por dos variantes, una es el blanqueo por oxidación y la otra por reducción, terminado este proceso puede ser adicionado colorantes ópticos para darle aún más brillo al color blanco.

El proceso de mercerizado solo les otorga a las fibras un acabado brillante y más suave, solo para el caso del algodón.

El proceso de teñido ayuda a darle color a las fibras mediante una solución con colorante a alta temperatura, la cual se fija al textil para su siguiente proceso, en este paso es donde más productos químicos son adicionados como auxiliares textiles que dan suavidad, firmeza, textura, resistencia a la luz, al lavado y a la degradación (Pérez M. 2014).

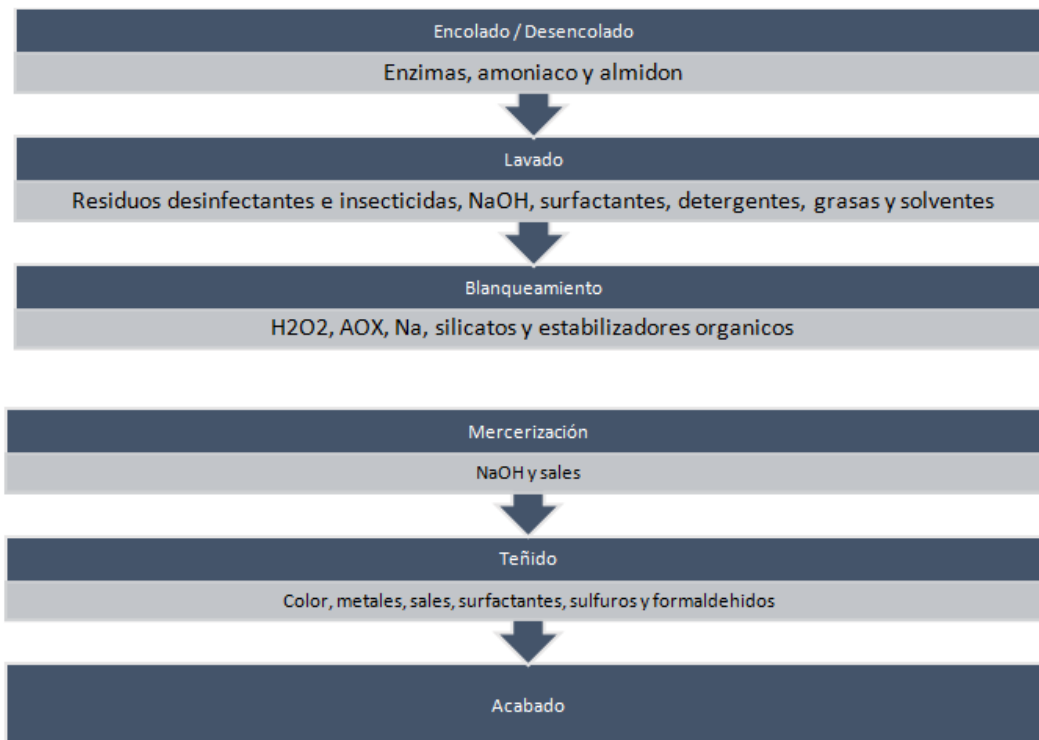


Figura 1 Procesos de fabricación dentro de la Industria Textil

La industria textil requiere gran cantidad de agua para sus procesos productivos. De 100 a 150 litros de agua son necesarios para producir un kilogramo de productos textiles (Carvalho *et al.* 2016). El agua residual resultante está altamente contaminada debido a la presencia de colorantes, surfactantes, sales

inorgánicas y distintos compuestos químicos empleados en el proceso de producción de textiles (Buscio *et al.* 2015). Algunos parámetros característicos de estos efluentes están mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5 Parámetros característicos de efluentes textiles (Buscio *et al.* 2015).

Parámetro	Cantidad
Color visible	11-4500 unidades (Azul)
DQO	900-5000 mg/L
pH	Alcalino (9-11)
DBO₅	0.15 mg/L
Sólidos Totales	6000-7000 mg/L
Turbidez	300-400 UNT
Sólidos suspendidos	185-294 mg/L

1.3.3 Problemática ambiental de la industria textil

El cuidado del medio ambiente es en la actualidad un reto para el mundo entero, en especial lo relacionado con la contaminación del agua la cual ha sido objeto de estudio por mucho tiempo, con el fin de proponer estrategias de remediación. Dentro de los principales factores de contaminación del agua son provocadas por las descargas de aguas residuales ya sean municipales las cuales cargan consigo detergentes, grasas, sólidos y otros; las descargas industriales como las petroleras, la química y la textil que llevan contaminantes químicos, con mayor afectación a los mantos acuíferos (CONAGUA, 2019).

Muchos contaminantes dentro del agua han sido investigados, dentro de los cuales se enfocan a contaminantes orgánicos que debido a sus bajas concentraciones en los cuerpos de agua no habían sido objeto de estudio, dentro de estos contaminantes se encuentran los pesticidas, los fármacos y otros (Barceló *et al.*, 2008). Estos contaminantes son conocidos como contaminantes emergentes y se llaman así porque no eran conocidos, por lo que se sabe poco de su presencia, impacto, regulación y tratamiento, a excepción de los colorantes que ya eran remotamente conocidos y utilizados lo que puede llegar a decirse que son

contaminantes recalcitrantes y estos son los que más han llamado la atención, su presencia se debe a que en las industrias textiles se utilizan 80% de los colorantes sintéticos conocidos y dentro de las etapas de teñido y fijación, además de que alrededor del 20% de las aguas utilizadas en el último proceso mencionado llegan a los cuerpos de agua sin un previo tratamiento.

1.4 Industria del colorante

La industria de colorantes está muy relacionada con la industria textil de manera que un incremento en la producción de fibras requerirá mayor producción de colorantes, aunque no en la misma proporción (Trinidad 2017). Hay alrededor de 10,000 colorantes y pigmentos y se producen al año 700,000 toneladas al año en todo el mundo (Trinidad 2017). La principal fuente de contaminación en los efluentes textiles está constituida por la presencia de colorantes azo que son difíciles de degradar en sistemas de tratamiento convencional (Trinidad 2017)).

Cada tipo de colorante presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes, que les atribuyen características recalcitrantes y efectos tóxicos para el ambiente (Willmontt *et al.*, 1998). Su presencia en el agua residual textil en bajas concentraciones es muy visible e indeseable (Nigam *et al.*, 2000). La presencia de colorantes en el agua residual de la industria textil se debe principalmente a que, durante el proceso de acabado de telas e hilos, particularmente durante el teñido, el colorante no es fijado completamente y queda un residuo de colorante que no se fijó que varía del 12% - 30% dependiendo del tipo de colorante y del proceso usado para su fijación. Este colorante residual es el que, incorporado a las aguas superficiales, da un aspecto no estético que demerita la transparencia del agua (Trinidad 2017).

1.5 Colorantes

Los colorantes son compuestos orgánicos que otorgan a los materiales cierto color casi permanente, el color es consecuencia de dos tipos de agrupaciones atómicas que son el grupo cromóforo (responsable del color) y auxocrómo; debido al mal

tratamiento de las aguas residuales están presentes en cuerpos de agua, en la actualidad existen cerca de 10,000 tipos de colorantes (Robinson *et al.*, 2001). Los colorantes se clasifican comúnmente de acuerdo con el tipo de grupo funcional que contienen o su función, como son: antraquinónicos, ftalocianicos, tiamínicos, indigoides, compuestos azo y xantános (Bouraie y Din *et al.*, 2016). Por su naturaleza sintética se fabrican con el fin de ser resistentes a la luz (mediante sustituyentes voluminosos para proteger el doble enlace y al grupo cromóforo), al calor y a productos químicos, esto hace que sean de difícil degradación (Solís *et al.*, 2012), y en su descomposición se conduce a compuestos aromáticos más nocivos o tóxicos. Dentro de los tratamientos convencionales como filtración (primarios), fisicoquímicos (secundarios) y biológicos (terciarios) es muy complicado eliminarlos, por lo que esto conlleva a utilizar medidas diferentes de tratamiento o el uso de diferentes técnicas de tinción que no ocupen agua.

La estructura de los colorantes está formada por un grupo de átomos responsables de color (cromóforos), los más comunes son los azo (-N=N-), carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro y grupos quinoides. Estos colorantes están representados en la Tabla 6 donde se muestra la clasificación de los colorantes según su uso y a su grupo funcional; y un grupo auxocrómo que no confiere color pero son donadores de electrones los cuales intensifican la absorción de luz y desplazan el máximo del espectro a mayores longitudes de onda.

Tabla 6 Clasificación de los colorantes por grupo funcional y uso en los procesos (recopilada por cuenta propia).

Grupo funcional	Uso en los procesos
Azoicos	Ácidos
Antraquinónicos	Básicos
Indigoides	Dispersos
Derivados de ftalocianina	Directos
Polimetínicos	Reactivos
Estilbéticos	Azoicos sobre fibra
Sulfurosos	Sulfurosos
Trifenilmetánicos	Pigmentos
Xantános	

1.5.1 Colorantes tipo azo

Los colorantes azo son los más empleados en la industria textil y muestran un color muy vivo como el rojo, anaranjado o amarillo. Se caracterizan por su grupo funcional cromóforo que está representado por $-N=N-$. En esta clase destacan tres familias: monoazo, diazo y triazo; cada una de ellas existe con diferentes propiedades. Así encontramos los colorantes azo: ácidos, básicos, reactivos, directos, dispersos y pigmentos, siendo los colorantes monoazo dispersos los que mayor consumo tienen debido a que se usan para teñir fibras e hilos de poliéster, acetato, nylon y acrílico. Muchos de estos colorantes azo no son tóxicos, pero se han encontrado unos pocos que resultan ser mutagénicos como lo son la dinitroanilina naranja o los pigmentos naranjas 1, 2 y 5.

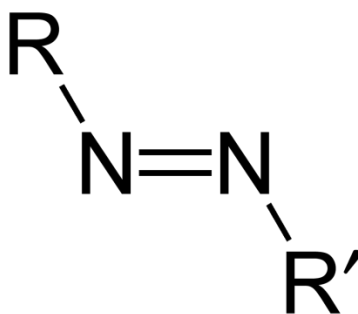


Figura 2 Fórmula química de los compuestos azo.

1.5.2 Colorantes ácidos

Este término se les da a los colorantes capaces de tener interacciones de carga con el sustrato como la fibra de lana, seda e inclusive es ocupado para darle color a ciertos alimentos. Los colorantes ácidos son compuestos orgánicos aniónicos que requieren para fijarse a la fibra que ésta esté disponible con sitios catiónicos. La ionización del colorante se logra al aplicar junto con él un ácido orgánico, puede ser ácido acético o sulfúrico, a un pH entre 2-6 unidades. En la Figura 3 puede observarse el colorante diazo rojo ácido 151.

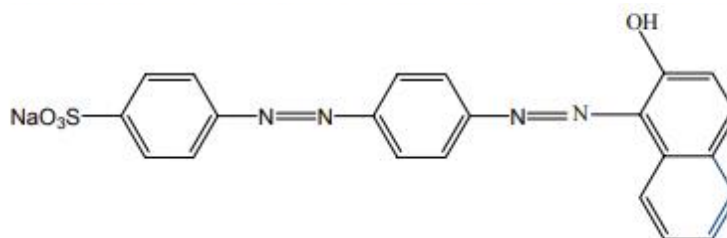


Figura 3 Colorante rojo ácido 151 (Kirk-Othmer, 1993).

1.5.3 Colorantes básicos

Son colorantes catiónicos que llevan una carga positiva en la porción cromófora de la molécula, aunque también la carga puede estar deslocalizada o distribuida a través de la porción catiónica del colorante. El catión es formado por protonación bajo condiciones ácidas. En condiciones alcalinas o neutras estos colorantes se comportan como colorantes dispersos (Cruz, 2003). Estos colorantes se utilizan a menudo para teñir fibras de poliéster y nylon modificado debido a que producen alta intensidad de color y mayor brillantez en la fibra que otros colorantes. Se aplican en solución acuosa con suficiente ácido acético para mantener el pH entre 4 y 6 unidades, tienen gran capacidad de teñido ya que sólo 1 mg/L de colorante produce una fuerte coloración al agua, además de que tiene la capacidad de ser adsorbido en muchos minerales y en la materia orgánica del agua. En la figura 4 se puede observar un colorante básico, muy ocupado y con grandes producciones a nivel industrial.

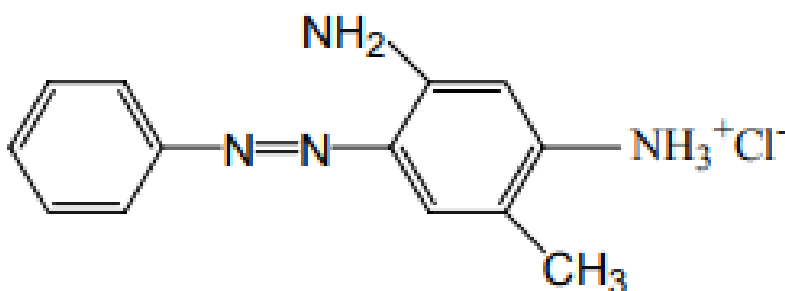


Figura 4 Color Azo Naranja Básico 1 (Kirk-Othmer, 1993).

1.5.4 Colorantes azo reactivos

Son colorantes aniónicos con varios grupos sulfónicos, que los hacen ser muy solubles en agua. Consisten básicamente de tres componentes: un colorante o grupo cromóforo, un grupo de unión y un grupo reactivo. Durante el teñido, el colorante se hidroliza lo que causa baja fijación de la fibra, además de incrementar su solubilidad (Figura 5).

Estos colorantes se caracterizan por tener en su estructura uno o más grupos reactivos complejos que pueden ser sensibles a la hidrólisis. Ejemplos de grupos reactivos son mono o diclorotriazina y tricloropirimidina entre otros.

La disminución de la reactividad de estos colorantes es causada por la presencia de grupos donadores de electrones, y el incremento de triazina sustituida con aminas se debe a grupos receptores de electrones como cloro, flúor o bromo en la estructura de la triazina.

El principal uso de estos colorantes es para teñir fibras naturales como algodón, lana y sintéticas como la poliamida (nylon).

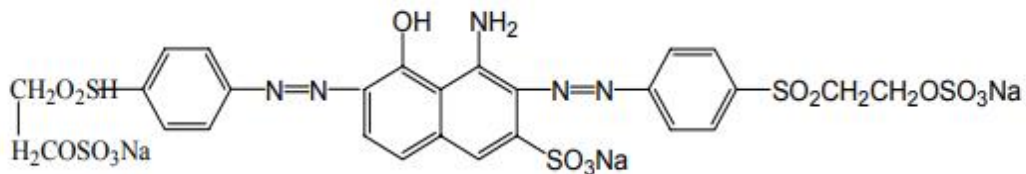


Figura 5 Estructura del colorante negro reactivo 5 (Kirk-Othmer, 1993).

1.5.5 Colorantes azo dispersos

Son colorantes aniónicos insolubles en agua por lo que se emplean en forma de dispersiones acuosas para teñir fibras sintéticas hidrófobas. Se utilizan en la tinción de poliéster, nylon, diacetato y triacetato de celulosa, así como fibras acrílicas, un ejemplo de estos colorantes es el azul disperso 79 visto en la Figura 6.

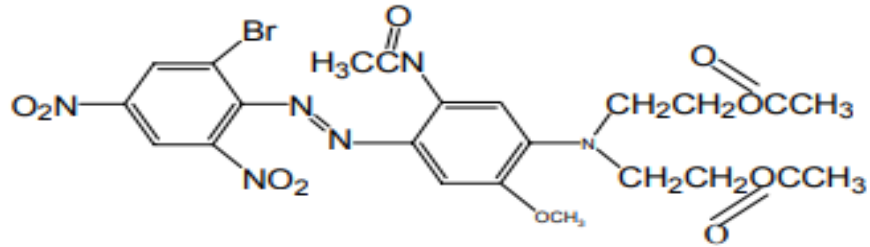


Figura 6 Estructura del colorante azul disperso 79 (Kirk-Othmer, 1993).

1.5.5.1 Colorante azul terasil

El colorante azul terasil es un colorante utilizado industrialmente para el teñido de los jeans, ropa deportiva y exclusivamente para telas de poliéster; pertenece al grupo de los colorantes antraquinónicos, el colorante azul terasil es producido en grandes cantidades para comúnmente ser usado en toda la industria de ropa deportiva a base de poliéster; después del tratamiento de las aguas residuales continua su presencia pues su formulación lo hace ser mucho más resistente a la luz y a químicos debido al uso de estas prendas deportivas para el que será utilizado.

Muchos de los efectos que trae consigo es en gran medida la coloración anormal en la superficie del agua que altera el ecosistema acuático como la disminución de la fotosíntesis acuática ya que restringe la penetración de luz solar, además de impactos adversos en Carbono Orgánico Total (COT), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, salinidad y otros parámetros.

En la producción de colorantes azoicos se han llevado estudios que permiten conocer que este tipo de colorantes son mutagénicos y carcinogénicos, aunque existen industrias en todo el mundo que producen este colorante con la firmeza de presentar un tinte de mayor rendimiento y eficacia operativa capaz de disminuir el efecto adverso ambiental, podemos observar su estructura química en la Figura 7.

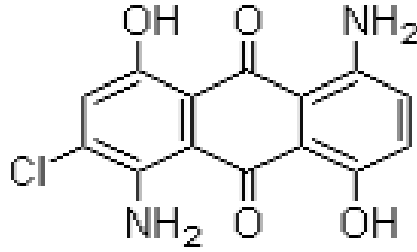


Figura 7 Formula química del colorante azul terasil.

1.5.6 Colorantes azo mordentes

Su característica principal es que no se fijan por si mismos a la fibra sino que necesitan de un metal, que generalmente es cromo, para formar lacas (Figura 8). El proceso se llama “mordentado” el cual consiste en tratar en medio ácido (pH 2-6) el colorante junto con sales metálicas tales como cromato de sodio para formar el complejo metálico en el sitio de teñido. La mayoría de los colorantes tienen estructuras con una sola ligadura azo. Son estables, no se desmetalizan fácilmente y no son afectados al tratarlos con soluciones alcalinas o con ácidos débiles (Kirk Othmer, 1993).

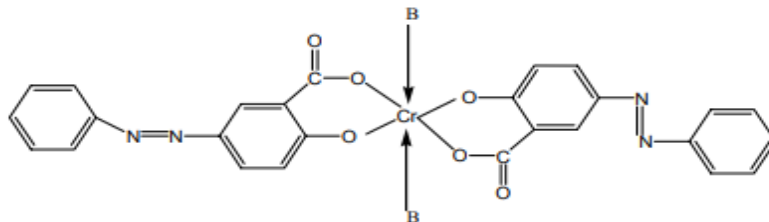


Figura 8 Estructura del colorante Azo Amarillo Mordante 1 metalizado.

1.5.7 Colorantes azo directos

Son colorantes aniónicos que se aplican en solución acuosa en presencia de un electrolito para hacer el teñido de la fibra, su estructura es compleja ya que contiene usualmente más de dos ligaduras azo; su principal uso es para teñir fibras de algodón, celulosa y viscosa entre otras, se puede observar la estructura del colorante azul directo 2 en la Figura 9. La ventaja principal de éstos es que son muy estables a la luz y se absorben fácilmente en las impurezas del agua.

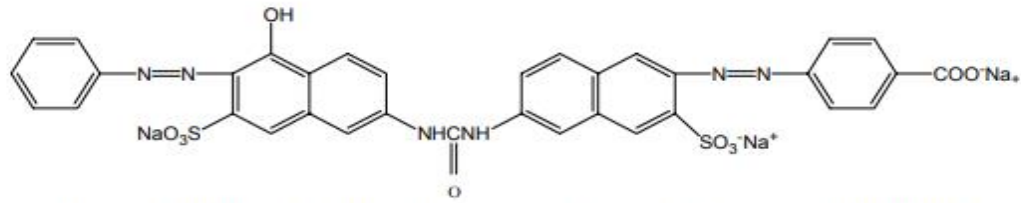


Figura 9 Estructura del colorante azul directo 2 (Piña Mondragon2017).

1.6 Degradación de colorantes en aguas residuales

1.6.1 Tratamiento de aguas residuales

Durante largo tiempo se han utilizado diversos métodos para el tratamiento de diferentes aguas residuales que presentan sustancias químicas y biológicas con el fin de reducir su nivel hasta los máximos permisibles en la normatividad vigente, aunque no suelen eliminar todas las sustancias presentes en estas aguas por ejemplo las sustancias químicas emergentes y las recalcitrantes; por esto se han comenzado a utilizar diferentes tratamientos más específicos o su combinación para reducir el impacto medioambiental que producen las aguas residuales. El tren de tratamiento de aguas residuales es una serie de procesos unitarios el cual inicia con un pretratamiento (físico), que básicamente es la remoción de los sólidos gruesos mediante rejillas y desarenadores, se continúa con un tratamiento primario (físico o químico), que utiliza tanques de sedimentación para remover parte de los contaminantes en forma de lodos, a continuación se lleva el tratamiento secundario (biológico), que esencialmente es el uso de microorganismos benéficos para consumir otra parte de contaminantes. Al final se lleva un tratamiento terciario o avanzado en el cual se lleva a cabo una desinfección del agua y/o reducción de algunos nutrientes que favorecen el crecimiento de flora acuática. Muchos contaminantes no son eliminados en ninguna de las etapas anteriores, es el caso de los colorantes, farmacéuticos, metales pesados, pesticidas, plaguicidas, nano partículas de oro y plata, drogas, entre otros por lo que se debe utilizar otras técnicas que favorezcan a las industrias a reducir estos contaminantes (Ruiz, 2003). Estas técnicas pueden ser

los lodos activados y lagunas de estabilización que mezclan las aguas residuales con microorganismos y junto con aireación comienzan a degradar contaminantes; los filtros percoladores que utiliza nuevamente a organismos vivos en una especie de roca para hacer pasar las aguas contaminadas para eliminar los materiales orgánicos, en estos procesos biológicos se degradan la mayoría de los materiales orgánicos y se absorben alguna parte de los metales pesados, pero no hay disminución en otros tantos como los colorantes, sin embargo estos procesos suelen tener ciertas desventajas y ventajas enumeradas en la Tabla 7.

Tabla 7 Ventajas y desventajas de los procesos de biomasa más utilizados (elaboración propia).

Procesos de Biomasa	Ventajas	Desventajas
Lodos Activados	Remover materia orgánica en términos de DBO, por medio de mineralización (gasificación por bacterias heterotróficas) y síntesis biológica.	Alta formación de lodos que deben ser estabilizados, demanda necesaria de oxígeno para dar las condiciones adecuadas, problemas de olores.
Zanjas de oxidación	Remover materia orgánica en términos de DBO, la edad de los lodos es menor que en lodos activados.	Sus impactos son igual a los de lodos activados.
Reactores biológicos secuenciales	Consta de al menos 4 procesos cíclicos: llenado, reacción, decantación y vaciado, por lo que se reduce el espacio utilizado, remueven la materia orgánica, eliminan el uso de sedimentadores.	Los impactos ambientales producidos pueden referirse a malos olores, alta cantidad de lodos y el tiempo de llenado y vaciado altos.
Biorreactores con membrana	Altos valores de remoción de contaminantes, baja producción de lodos y uso de menores espacios para su instalación.	Altos costos por equipo, instalación y retrolavados o mantenimiento de la membrana.
Reactores anaeróbicos de flujo ascendente	Reducción de alta cantidad de materia orgánica proveniente de las industrias	Alta producción de gases, lodos menos estables.

Debido a que no se pueden reducir ciertos productos químicos se utilizan técnicas diferentes para la eliminación de estos contaminantes como la coagulación-floculación el cual elimina entre otros, metales pesados, color, olor en las aguas residuales mediante la adición de un producto químico que junto con agitación se van aglomerando los contaminantes gracias a fuerzas físicas por desestabilización de coloides y sus cargas que luego con ayuda de la gravedad son sedimentados al fondo del recipiente (Aguilar, 2002).

1.6.2 Tratamientos fisicoquímicos

Los procesos fisicoquímicos comúnmente empleados a nivel industrial en el tratamiento de efluentes de la industria textil son la coagulación y precipitación, ósmosis inversa y ultrafiltración, así como el tratamiento por electrólisis, tratamiento con ozono, tratamiento por adsorción y tratamiento con cloro. Su uso está restringido por su elevado costo, el empleo de materiales de importación o el impacto que generan al ambiente. A continuación, se presenta una breve descripción de los tratamientos anteriores. Los procesos físicos químicos se presentan cuando la transformación de los componentes del agua residual es mediada por reacciones químicas en conjunto con operaciones unitarias. Los principales procesos unitarios de este tipo incluyen la coagulación, precipitación, desinfección, oxidación, oxidación avanzada, intercambio iónico y neutralización química. Se emplean en la remoción de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos y en la desinfección del efluente antes de su descarga a los cuerpos receptores. Los procesos fisicoquímicos son aditivos y para la remoción de algún constituyente del agua residual es necesaria la adición de otra sustancia, lo que resulta en un incremento de los sólidos disueltos, a diferencia de las operaciones físicas y los procesos biológicos. Así mismo, otra desventaja de estos procesos es el manejo, tratamiento y disposición de una mayor cantidad de lodos producidos, así como costos variables de los químicos empleados. No obstante, este tipo de procesos es de utilidad cuando se requieren resultados rápidos y con gran efectividad, con una huella de construcción menor, a expensas de mayores costos por el suministro continuo de reactivos.

1.6.3 Coagulación y Floculación

El agua a tratar se hace pasar a través de celdas electroquímicas en la cuales se generan especies coagulantes que absorben y precipitan los contaminantes. Las eficiencias de eliminación son superiores al 90% para diferentes tipos de colorantes (Cruz, 2000).

El fenómeno mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y su aglomeración posterior es lo que se conoce como coagulación y floculación, de hecho, es un proceso en dos etapas.

En la primera etapa de coagulación se elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides, y la floculación se da a continuación y consiste básicamente en la aglomeración de los coloides mediante la atracción de las partículas con el aglutinamiento que se logra por la presencia de sustancias conocidas como floculantes, se puede observar burdamente el proceso en la Figura 10.

La coagulación-floculación de los coloides se puede lograr mediante uno o varios de los siguientes mecanismos:

- Compresión de la doble capa
- Neutralización de la carga: se logra mediante la adición de una sustancia denominada coagulante y que puede ser algún polímero inorgánico u orgánico de naturaleza catiónica.
- Aglutinamiento: es un mecanismo que se desea realizar una vez que las cargas eléctricas hayan sido neutralizadas. Esto se puede lograr con la adición de un polímero que permita que los flóculos se vayan aglomerando.
- Entrampamiento: es tal vez uno de los mecanismos más utilizados sobre todo cuando las soluciones son muy estables. Este se logra mediante la formación de un flóculo de algún hidróxido de aluminio o de hierro, bajo condiciones controladas de concentración y pH. Este flóculo arrastra los coloides y los entrapa dentro de su red para así eliminarlos.

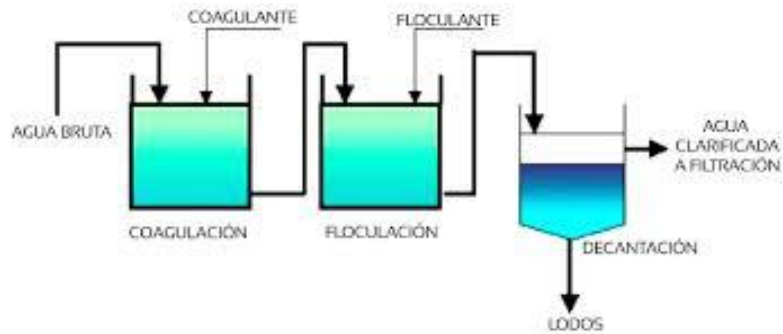


Figura 10 Proceso de coagulación- floculación (según SSWM).

1.6.4 Tratamientos biológicos

Debido a las desventajas que presentan los tratamientos fisicoquímicos, se ha generado un gran interés por otros procesos y condiciones de operación por medio de los cuales es posible la remoción de los colorantes azo, por medio de métodos biológicos, bajo diferentes condiciones de oxígeno (aerobios, anaerobios y la combinación anaerobios/aerobios).

1.6.4.1 Procesos anaerobios

El tratamiento aerobio de las aguas residuales textiles no quita sustancialmente el color causado por los colorantes azo. Sin embargo, bajo condiciones anaerobias muchos tipos de bacterias pueden reducir esta clase de colorantes, eliminando la ligadura azo y formando aminas aromáticas (Weber y Wolfe, 2006; Banan *et al.*, 2001). Estudios de biodegradación con varios colorantes mostraron que el proceso anaerobio puede eliminar el color de los efluentes textiles, mejorando la biodegradación biológica de un subsecuente tratamiento aerobio para la mineralización de los compuestos intermediarios (Brown y Hamburger, 2007; Seshandri *et al.*, 2008). La degradación anaerobia de los colorantes textiles produce solamente la reducción del grupo azo; mientras que la mineralización del colorante generalmente no ocurre, como sucede en un típico proceso anaerobio donde se genera metano, bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros gases.

1.6.4.2 Decoloración aerobia por bacterias

Seshandri y Bishop (2008) mencionan que el proceso de lodos activados que normalmente se usa para tratar efluentes textiles con elevada concentración de color no es efectivo para remover la mayoría de los colorantes, ya que solamente se produce una adsorción de los mismos en los lodos. La deficiencia de electrones que presenta el anillo aromático de los colorantes azo hace que sean resistentes al ataque electrofílico por oxigenasas por lo que persisten al tratamiento aerobio (Razo-Flores, 2007). También la presencia de dos grupos nitro en el anillo crea impedimentos estéricos y reduce la densidad electrónica del anillo aromático impidiendo el ataque electrofílico de las enzimas dioxigenasas, en tanto que un solo grupo nitro con un activador como, por el ejemplo, un grupo hidroxilo o carboxilo facilita la transformación en medio aerobio (Cruz, 2003).

El catabolismo bacteriano aerobio de colorantes azo es iniciado por azoreductasas no sensitivas al oxígeno de alta especificidad al sustrato. Estas enzimas catalizan el rompimiento reductivo del grupo azo con NADPH (Dinucleótido adenindifosfotonicotinamina) como donador de electrones (Zimmermann *et al.*, 1984). Estudios realizados por Coughlin (2007) demostraron que una especie seleccionada previamente expuesta a un colorante por largo tiempo pudo reducir bajo condiciones aerobias el grupo azo, pero cuando se incluyeron otros grupos funcionales al anillo se perdió la habilidad degradativa. En el metabolismo de compuestos aromáticos, las oxigenasas altamente específicas catalizan la apertura del anillo aromático de intermediarios difenólicos como el catecol.

El rompimiento puede ocurrir entre dos átomos de carbono, cada uno de los cuales está ligado a un grupo hidroxilo. Esta reacción generalmente forma 3-oxoadipato, el cual se transforma en acetil-CoA y succinato que son oxidados en el ciclo de los ácidos tricarbónicos, donde hay al menos diez reacciones y los productos finales con CO₂, H₂O y otros productos que varían según la estructura del compuesto original.

1.7 Degradación de colorantes mediante procesos avanzados

Son procesos químicos y físicos especializados con la finalidad de disminuir la cantidad de contaminantes específicos que quedan en el agua tras los tratamientos primarios y secundarios dentro del tren de tratamiento de aguas residuales, mediante procesos oxidativos o por filtración, estos suelen depender del tipo de contaminante y su estructura, así como otros parámetros físicos y químicos.

1.7.1 Ósmosis inversa

Es un proceso en el que el agua se separa de las sales disueltas en solución, filtrándola a través de una membrana semipermeable a una presión mayor que la osmótica causada por las sales disueltas en el agua residual, puede observarse el proceso en la Figura 11. Mediante este proceso se obtienen eficiencias de eliminación de 95-100% y es eficiente en el tratamiento de colorantes básicos, ácidos, directos, dispersos y reactivos (Rodríguez T. *et al.* 2008). La osmosis es el fenómeno por el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable de una disolución diluida a una concentrada para lograr un equilibrio iónico entre ambos lados de la membrana. En la naturaleza, este fenómeno se manifiesta en las paredes celulares, que regulan la hidratación de la célula y el intercambio iónico entre la célula y el espacio intersticial. La osmosis inversa es el proceso de transferir solvente a través de una membrana semipermeable desde una disolución concentrada a una diluida. La mayor parte de la energía en un sistema de osmosis inversa es usada para la bomba de agua que hace fluir el agua por las membranas y vence la presión osmótica necesaria para hacer fluir el agua a través de la membrana semipermeable.

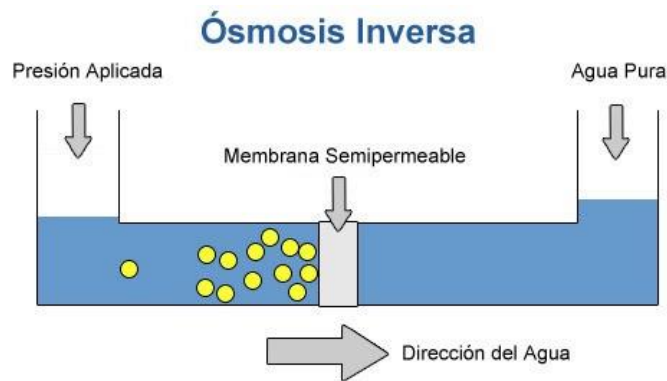


Figura 11 Esquema de filtración de ósmosis inversa

1.7.2 Tratamiento con ozono

El ozono es un oxidante más potente que el cloro. Es eficaz en la oxidación de colorantes básicos, ácidos y directos. Produce efluentes sin color, pero la materia orgánica alcanza una remoción del 5-20% de DQO en aguas residuales textiles contaminadas con colorantes reactivos (Gähr *et al.*, 1994). La dosis de ozono se incrementa de manera proporcional con la concentración de materia orgánica y tiene la ventaja en los colorantes diazo que la decoloración se logra en un corto tiempo.

1.7.3 Tratamiento con cloro

Es uno de los métodos más utilizados para la eliminación de color por oxidación, además de que es eficiente para la degradación de colorantes solubles. La oxidación con cloro produce una coloración amarillenta o naranja, es aplicable para colorantes dispersos. Se han obtenido eficiencias de eliminación del 90%.

1.7.4 Tratamiento por adsorción

La adsorción implica la acumulación o la concentración de sustancias en una superficie o interface (Weber, 1978). En el caso del tratamiento de colorantes azo se utiliza como adsorbente el carbón activado, sílice y otras resinas. En general los tratamientos fisicoquímicos tienen la desventaja de producir lodos

relativamente hidrofílicos, que deben ser sometidos a filtración o centrifugación para eliminar el exceso de agua, además que la mayoría de las técnicas son costosas (Bahorsky y Bryan, 1995), por otra parte la adsorción y la coagulación/precipitación son métodos que no destruyen los contaminantes solo los concentran y los separan, de modo que la contaminación se transfiere de un lugar a otro (Metcalf y Eddy, 1991).

1.7.5 Procesos Avanzados de Oxidación

Estos procesos tienen por objetivo la eliminación de compuestos solubles no biodegradables, presentes en las aguas residuales. El proceso consiste en una oxidación química en condiciones suaves de presión y temperatura hasta la mineralización completa de contaminantes. El agente oxidante es una especie de radical denominado hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) con una elevadísima capacidad oxidante, y con tiempos de reacción muy cortos.

Debido a la altísima reactividad de estas especies es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos logrando así una reducción de DQO, COT y toxicidad en las aguas residuales tratadas. Además, la generación de radicales se realiza a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono.

Los procesos de oxidación avanzada están considerados como la “mejor técnica disponible” para la depuración de compuestos recalcitrantes, tóxicos, contaminantes emergentes y contaminantes solubles o no biodegradables.

Los procesos avanzados de oxidación que se basan en producir un cambio en la estructura química de los contaminantes, y que involucra en gran manera el radical $\cdot\text{OH}$ generado mediante procesos fotoquímicos y este radical es el encargado de oxidar las moléculas orgánicas, estos procesos se pueden clasificar entre procesos no fotoquímicos como la ozonización en medios alcalinos y oxidantes, oxidación electroquímica y por procesos fentón y los fotoquímicos como fotólisis directa, del agua con UV y la fotocatalisis heterogénea (Tabla 8). Estos

procesos son útiles como pretratamiento de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como un pos-tratamiento para depurar agua que vaya a descargarse ya a mantos acuíferos.

Estos procesos tienen la finalidad de convertir a los contaminantes que se encuentran en las aguas en moléculas o compuestos menos tóxicos y conseguir una mineralización completa de estos (Sanz *et al.*, 2013).

Tabla 8 Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada (elaboración propia).

Procesos no Fotoquímicos	Procesos Fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ($O_3/\bullet OH$)	Oxidación en agua subcrítica y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2)	Procesos fotoquímicos
Procesos Fentón (Fe^{2+}/H_2O_2) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Oxidación electroquímica	UV/ O_3
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones.	Foto-Fentón y relacionadas
Ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

Las técnicas de tratamiento no fotoquímicas pueden no cumplir con la mineralización completa de los contaminantes orgánicos, lo que puede ser un problema cuando se forman intermedios más contaminantes que los reactivos iniciales o se forman hidroxocomplejos que no dejan que acabe la reacción y su efectividad disminuye en gran medida, ya que algunos de los procesos de oxidación avanzada no fotoquímicos pueden generar intermedios más tóxicos que el compuesto original inicial.

La destrucción completa de compuestos orgánicos se puede lograr combinando la radiación UV con otros procesos de oxidación avanzada, ya que la radiación UV proporciona energía y facilita, de este modo, la generación de los radicales hidroxilo.

1.7.5.1 UV/H₂O₂

La combinación de la radiación ultravioleta (UV) con el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) conduce a la escisión fotolítica del peróxido en dos radicales •OH. Este proceso se ha usado en el tratamiento de aguas para la degradación de contaminantes orgánicos como fenoles. Utilizando en la mayoría de los estudios UV-C, a la cual se atribuye la absorción de H₂O₂ produciendo mayor cantidad de •OH. Y observando que la longitud de onda más corta era la menos efectiva para la eliminación de los contaminantes (Matafonova y Batoev, 2018). También se observó la superioridad del proceso sobre el proceso de desinfección para la inactivación de ARB (bacteria resistente a los antibióticos por sus siglas en inglés) en aguas residuales, que se atribuye a la generación in situ de radicales hidroxilo altamente reactivos, que pueden mejorar significativamente el potencial de oxidación del sistema químico, dando como resultado cambios en la estructura de la célula bacteriana. Además, se ha considerado esta tecnología LED UV-C/H₂O₂ como una tecnología ambientalmente segura para el tratamiento de aguas. A pesar de esto, de momento es económicamente inaplicable a gran escala, debido a sus elevados costos. Este proceso también se puede combinar con el efecto del ozono, debido a que la radiación UV provoca la escisión del ozono disuelto, seguido de una reacción rápida del oxígeno atómico obtenido con el agua, de lo que se obtiene peróxido de hidrógeno.

1.7.5.2 Foto-Fentón

En este proceso, cuando los iones Fe³⁺ y el H₂O₂ están expuestos a la radiación ultravioleta, el peróxido se descompone por la actividad fotocatalítica de los iones Fe³⁺ que lleva a la generación de radicales •OH e iones Fe²⁺. Todo esto se produce a pH 3, al igual que el proceso Fentón clásico. Además, ha sido un proceso muy investigado debido a la posibilidad de utilizar fuentes de energía renovables como el sol y una baja concentración de catalizador (Clarizia, *et al.* 2017). En presencia del peróxido, las especies formadas de hierro (II) experimentan una reacción clásica de Fentón, generando •OH adicional. La luz UV

y visible hace que el proceso Fenton se acelere, pero el rendimiento es bajo. Este rendimiento aumenta cuando los compuestos poseen un ligando orgánico (como el ferrioxalato), teniendo así, una mayor eficacia, debido a la elevada absorción de radiación UV. La mayor ventaja del foto-Fenton es que no genera subproductos. La eficacia puede mejorarse combinando este proceso con agentes oxidantes (H_2O_2 , O_3 ...) o fotocatalizadores (TiO_2). Estos procesos son de especial relevancia para aplicaciones ambientales. Los que involucran luz solar se han probado para oxidar tintes, productos farmacéuticos y herbicidas (Mirzaei *et al.*, 2017). Además, los contaminantes biológicos, incluidos los virus y las bacterias, se pueden eliminar también con estos procesos (Hossain *et al.*, 2014; Michael-Kordatou *et al.*, 2018). El principal desafío para las aplicaciones de este proceso en desinfección de agua es evitar las variaciones del pH junto con la precipitación del hierro. Ya se sabe, que la reacción es más efectiva a pH 3, pero los costes operacionales asociados con la acidificación y posterior neutralización de grandes volúmenes de aguas residuales a tratar son demasiado altos. Además, produciría un aumento de la salinidad, por lo que la mejor opción es que este proceso se limite a pH neutro o casi neutro. Para mejorar los problemas de solubilidad de los procesos Fenton a pH neutro, se pueden aplicar ligandos orgánicos (Oszajca *et al.*, 2016).

1.7.5.3 Fotocatálisis Heterogénea

La fotocatálisis heterogénea es una de las técnicas más utilizadas, este proceso consiste en la excitación de un material semiconductor sólido que actúa como fotocatalizador al aplicarse luz (UV o visible) sobre él, lo que genera pares electrón hueco. Posteriormente, los huecos (H^+) se unen con el agua presente en el medio de reacción y dan lugar a los radicales hidroxilo necesarios para el proceso de degradación; del mismo modo los electrones reaccionan con el oxígeno y se obtienen radicales superóxido (O_2^-), tiene el fin de destruir los contaminantes orgánicos mediante el uso de luz solar o artificial la cual es la fuente de energía, junto con un catalizador (TiO_2 , CdS, SrTiO_3 , ZnO, etc.) en el que en su superficie se llevará a cabo la oxidación.

El proceso fotocatalítico inicia cuando al fotocatalizador se le es irradiado energía, la existencia de una separación entre una banda de valencia y de conducción generan un par de hueco-electrón, lo que hace migrar los electrones a la banda de conducción la cual generan reacciones de oxidación dejando huecos con cargas positivas que generan reacciones de reducción (Figura 12). En este proceso se debe tener en cuenta algunos factores influyentes en la fotocatalisis como el uso de cierta irradiación del espectro, el medio en el que se realice y los semiconductores (Blanco, 2005).

Bajo irradiación de luz UV o visible, los fotones pueden excitar el material semiconductor apropiado y producir pares de electrones y huecos en la banda de conducción y valencia, respectivamente. Como este proceso necesita, generalmente, lámparas UV, precisa de gran cantidad de energía, lo que aumenta los costes. Sin embargo, si se utiliza energía solar se reducen sus costes y se puede considerar una tecnología sostenible con el medio ambiente. Además, se ha encontrado que, combinando esta tecnología con algunos de los procesos de oxidación avanzada (PAOs por sus siglas en inglés) mencionados anteriormente, se producen mejoras en la efectividad y otras ventajas adicionales como mejora en la eficiencia energética y la mayor generación de radicales hidroxilo, por lo que recibe mayor atención que los procesos individuales aislados.

La ventaja de esta tecnología frente a otros PAOs es que no genera lodos, lo que supone una reducción de los costos posteriores al tratamiento. Asimismo, se ha ayudado a este proceso con otros como las microondas, ya que estas tienden a mejorar las velocidades de reacción. El único problema de este caso es que la mayor parte de la energía se convierte en calor, por lo que tiene baja eficiencia energética y deben emplearse dispositivos de enfriamiento para evitar sobrecalentamientos. En la Figura 13 puede observarse el análisis FODA de esta técnica de reducción por oxidación, el cual habla de sus debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades (elaborada por cuenta propia).

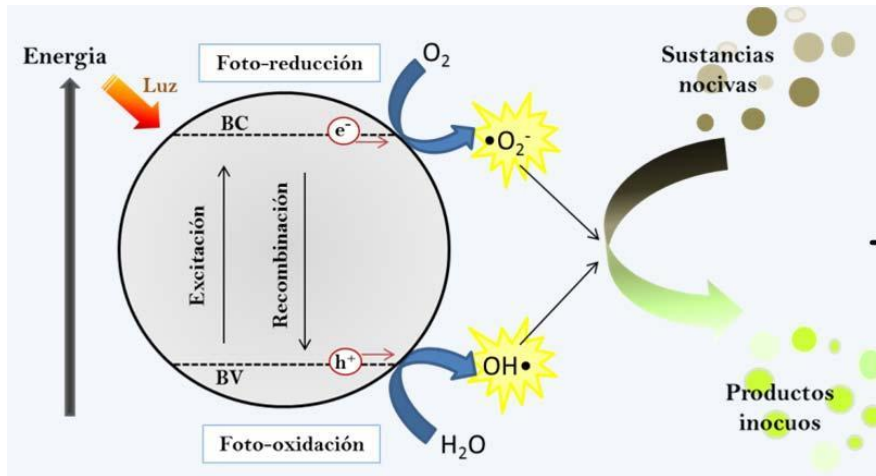


Figura 12 Proceso de fotocatalisis heterogénea con un semiconductor.



Figura 13 Análisis FODA de la fotocatalisis heterogénea

1.8 Semiconductores

Los semiconductores son sustancias que juegan un rol importante en la fotocatalisis que deben poseer propiedades fisicoquímicas y ópticas para su aplicación en la degradación de contaminantes orgánicos, también que tengan una

alta estabilidad química con un bajo costo de producción y altos rendimientos fotocatalíticos (Chong, *et al.*, 2010).

El semiconductor más utilizado ha sido el TiO_2 debido a que su energía de salto de banda de 3.2 eV. Hace que toda la radiación UV por debajo de los 387nm es suficiente para excitar al catalizador, también cuenta con una alta área específica entre 50 m^2/g , también propiedades ópticas y cristalográficas necesarias para sus análisis (Sanz, *et al.*, 2013).

A pesar de sus capacidades tiene un costo de producción alto, la cantidad usada para realizar la fotocatalisis es alta y además de complicaciones derivadas de la necesidad de filtrar las partículas de TiO_2 del agua a tratar, pero sobre todo se ha demostrado que su reciclado es difícil y nada rentable, por lo que es necesario el uso de otros catalizadores más eficientes.

Es el caso de los titanatos (MTiO_3) los cuales se han estudiado para aplicaciones en sensores de gas, celdas electroquímicas y como catalizadores para la oxidación completa de hidrocarburos, CO y NO_x , los cuales presentan una buena estabilidad química y activo en la región visible del espectro electromagnético, pueden estar formados por diferentes metales como Ni, Pb, Fe, Co, Mn, Cu y Zn (Ochoa, 2016).

Otro caso es el uso de óxidos mixtos de aluminio o mayormente conocidos como alúminas son utilizados en el tratamiento de aguas residuales como floculantes, la cual permite que la materia orgánica o inorgánica en suspensión se asocie en partículas más grandes, así como también para remover arsénico. Es preparada por deshidratación del hidróxido de aluminio y calcinación a temperatura de 300 a 600°C, por lo general tienen un área superficial entre 50-300 m^2/g (Chong, *et al.*, 2010); los óxidos de silicio son materiales inorgánicos usados en muchos procesos industriales para separación y adsorción de moléculas, biomedicina, aditivos en pinturas, tecnología de membranas e ingeniería molecular además últimamente como soporte de catalizadores para formar catalizadores heterogéneos, el cual debe tener una alta área superficial y estructura molecular

adecuada, con un tamaño de partícula menor para mejorar la estabilidad y porosidad.

Las zeolitas naturales normalmente se encuentran en cierto tipo de rocas sedimentarias (tobas) en forma de pequeños cristales asociados con arcillas y otras fases de similar densidad. Entre las zeolitas naturales sobresale la Clinoptilolita por su abundancia, bajo costo y disponibilidad (Ackley y Yang, 1991). Las zeolitas de este tipo pertenecen a la familia de la heulandita y presentan una estructura similar a ésta, con una relación molar Si/Al = 4-5.5, en la que predominan los iones Na⁺ y K⁺ en la zeolita que existe en forma natural. Entre las zeolitas sintéticas y naturales la estructura de la Erionita llama la atención por su abundancia en la naturaleza. La zeolita Erionita es una serie de minerales con el mismo nombre pero con variantes en iones como el Na, K y Ca; tiene un gran potencial en la técnica de separación de gases, en hidroisomerización, como intercambiador iónico para retención de metales pesados y como catalizador, el único inconveniente según la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer se ha demostrado que gracias a su estructura fibrosa, la inhalación de este mineral es carcinógeno en humanos (IARC, 2019).

1.9 Proceso Sol-Gel

El proceso sol gel es una ruta química que permite fabricar materiales amorfos y policristalinos de forma relativamente sencilla. Se pueden obtener nuevos materiales que por los métodos tradicionales de fabricación son muy difíciles de obtener, tales como combinaciones de óxidos (SiO₂, TiO₂, ZrO₂, etc.), además de poder contaminarlos con iones de tierras raras o colorantes orgánicos. Las estructuras únicas, microestructuras y compuestos que pueden hacerse con el proceso sol-gel abren muchas posibilidades para aplicaciones prácticas, por nombrar algunas tenemos la fabricación de componentes ópticos, preformas para fibras ópticas, recubrimientos dieléctricos, superconductores, guías de onda, nanopartículas, celdas solares, etc.

El proceso sol-gel permite la fabricación de materiales amorfos y policristalinos con características especiales en su composición y propiedades (Figura 14). Su utilidad radica en que necesita menor temperatura en comparación con los métodos tradicionales de fabricación de vidrios por fusión. El sol-gel es una ruta química que inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de este sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel). El solvente se le extrae al gel simplemente dejándolo reposar a temperatura ambiente durante un periodo de tiempo llamado envejecimiento, en el cual el gel se encogerá expulsando el solvente y agua residual. Al término del tiempo de envejecimiento, por lo general aún se tienen solventes y agua en el material, además de que el tamaño del poro es considerable. Para solucionar esto, el material se somete a un tratamiento térmico, al final del cual obtendremos nuestro material en forma de monolito o de película delgada (Masuda *et al*, 1990)

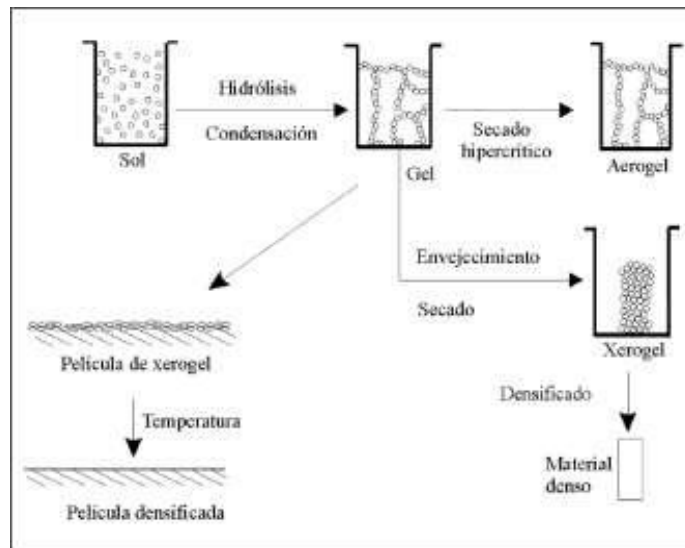


Figura 14 Proceso Sol-Gel (Masuda *et al.*).

Capítulo 2

Metodología

2.1 Síntesis de los óxidos mixtos de aluminio y silicio por el método Sol-Gel

Para realizar la síntesis de los catalizadores de aluminio y silicio se debe tener en cuenta las propiedades catalíticas que se requieren ya que un buen método de síntesis y la calidad de los precursores ayudan a obtener un catalizador con una mayor estabilidad térmica y catalítica, la bibliografía utilizada para cada catalizador fue de Masuda *et al.* (1990) y Bedolla *et al.* (2015). En la Figura 15 se puede observar el proceso esquematizado para la preparación de los óxidos mixtos de aluminio y silicio con y sin zeolitas naturales por medio del proceso Sol-gel, el cual se divide en 4 etapas principales que son la formación del sol, seguido por la formación del gel, continuar con el envejecimiento o maduración del gel y finalizar por un tratamiento térmico.

Sustancias para la Síntesis de óxido de aluminio

- Clinoptilolita, proporcionada por el laboratorio de investigación en zeolitas del ICUAP.
- Erionita, proporcionada por el laboratorio de investigación en zeolitas del ICUAP.
- Precursor de Aluminio: Secbutóxido de Aluminio $Al[O(CH_3)CHC_2H_5]_3$ / Pureza 95% /CAS#2269-22-9.
- Hexilenglicol / $C_6H_{14}O_2$ / pureza 99% / CAS#107-41-5.
- Agua destilada (agente gelificante).
- Etanol.

Sustancias para la síntesis de óxido de silicio

- Clinoptilolita, proporcionada por el laboratorio de investigación en zeolitas del ICUAP.
- Erionita, proporcionada por el laboratorio de investigación en zeolitas del ICUAP.
- Precursor de silicio [Si]: Tetraetilortosilicato (TEOS 98%, Merck).
- Solventes: Agua destilada y Alcohol etílico absoluto (99.7%, J.T. Baker)

- Catalizador: Ácido fluorhídrico (agente gelificante; 99%, Merck)

Además de la síntesis de los óxidos mixtos de silicio y aluminio con y sin las zeolitas naturales (Erionita y Clinoptilolita), se sintetizó alúmina (Al_2O_3) la cual se elabora de la misma forma que los demás catalizadores, el TiO_2 no fue sintetizado en el experimento.

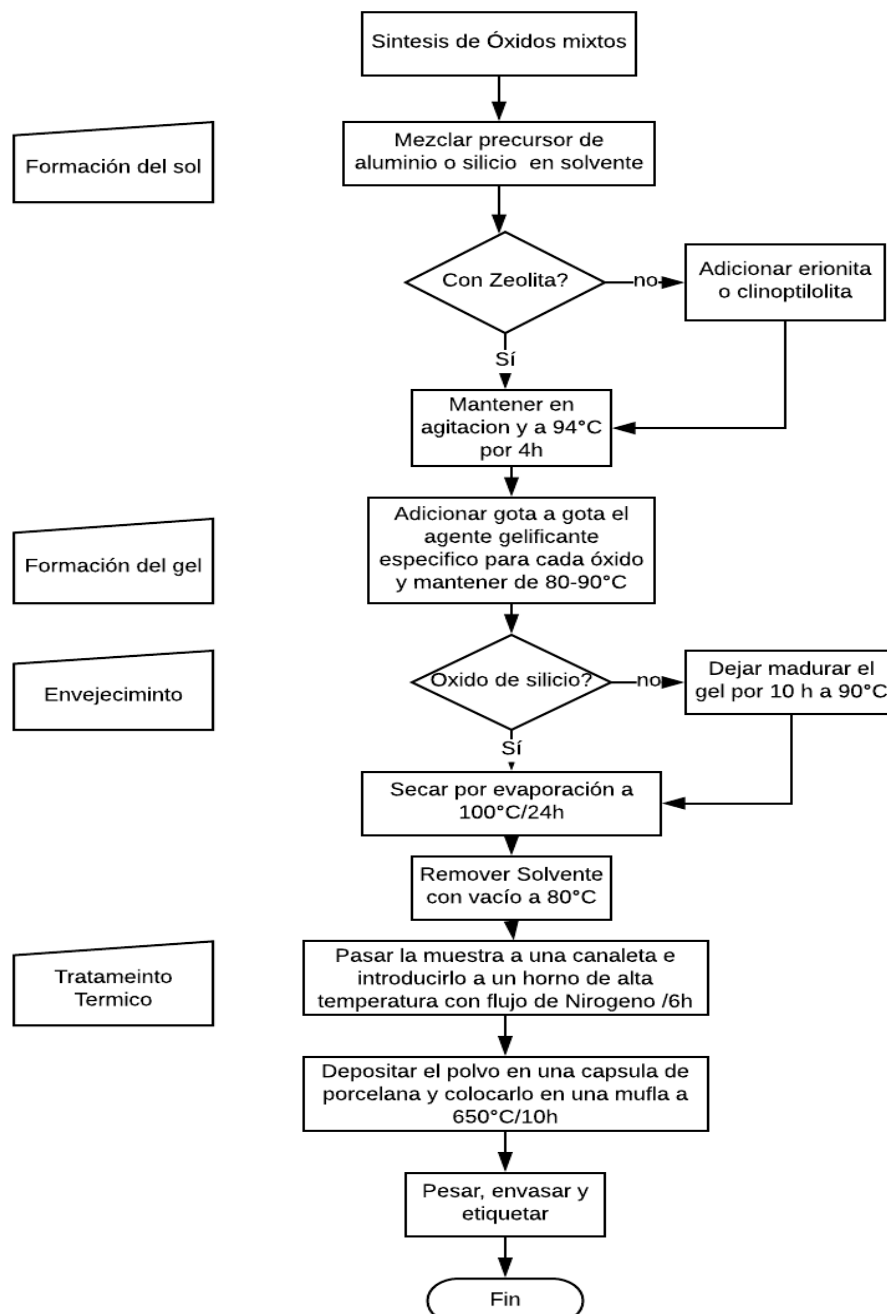


Figura 15 Diagrama de flujo de la síntesis de óxidos de silicio y aluminio con y sin zeolitas naturales.

Los catalizadores fueron sintetizados en cuatro pasos generales, el primero es la formación del sol, para luego formar un gel, todo esto se lleva a cabo en un sistema de calentamiento con agitación continua de los reactivos, junto con un sistema de enfriamiento (Figura 16), en el segundo paso el sistema cambia de función para poder secar la muestra junto con una bomba de vacío para poder quitar la mayor cantidad de agua (Figura 17), el tercer paso consiste en el tratamiento térmico donde se lleva la muestra con la menor cantidad de agua a un horno de alta temperatura y con un flujo de N_2 para darle más porosidad al polvo y al final a una mufla a alta temperatura para darle más reactividad.



Figura 16 Mecanismo para la preparación de los catalizadores por Sol-Gel.



Figura 17 Sistema de secado en la preparación de los catalizadores.

Se prepararon 6 catalizadores a excepción del TiO_2 (Figura 18) debido a que este último fue donado por el Dr. Fernando Hernández Aldana para tener un catalizador

normalmente utilizado en la fotocatalisis. Como se puede observar; en la Figura 19 el dióxido de silicio (SiO_2); en la Figura 20 la Clinoptilolita; en la Figura 21 la Erionita; en la Figura 22 la alúmina (Al_2O_3); en la figura 23 el dióxido de silicio con Clinoptitlolita (SiO_2 -Clinoptitlolita); y en la Figura 24 el dióxido de silicio con Erionita (SiO_2 -Erionita).

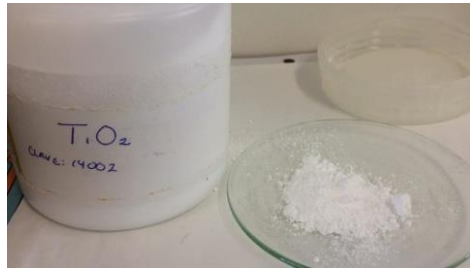


Figura 18 Dióxido de Titanio (TiO_2).



Figura 19 Dióxido de Silicio (SiO_2).



Figura 20 Clinoptilolita.



Figura 21 Erionita.



Figura 22 Alúmina (Al₂O₃).



Figura 23 SiO₂-Clinoptilolita.



Figura 24 SiO₂-Erionita.

Los 7 catalizadores fueron utilizados durante la fotocatalisis para la muestra textil (se reserva el nombre de la empresa de donde se obtuvo la muestra) y el colorante azul terasil a 50 ppm además de un blanco de cada uno obteniendo un total de 16 muestras, las muestras se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9 Muestras a ser utilizadas en la prueba de fotocatalisis.

Catalizador con Muestra textil (MT)	Catalizador con colorante azul terasil (AT)
MT+ TiO ₂	AT+ TiO ₂
MT+ SiO ₂	AT+ SiO ₂
MT+ Erionita	AT+ Erionita
MT+ Clinoptilolita	AT+ Clinoptilolita
MT+ SiO ₂ -Erionita	AT+ SiO ₂ -Erionita
MT+ SiO ₂ -Clinoptilolita	AT+ SiO ₂ -Clinoptilolita
MT+ Al ₂ O ₃	AT+ Al ₂ O ₃
MT+ Blanco	AT+ Blanco

2.2 Análisis de composición química elemental

Para obtener la composición química elemental de los catalizadores sintetizados por el método sol-gel se utilizó el equipo JEOL JSM-6610 LV (Figura 25), el cual cuenta con un espectrofotómetro de dispersión de energía de rayos X y un detector Oxford modelo INCA. El análisis se realizó a 3 puntos de la muestra para tener una mejor precisión en la composición química elemental de los 7 catalizadores utilizados.



Figura 25 Equipo JEOL JSM-6610 LV utilizado para la composición química elemental de los catalizadores.

2.3 Pruebas fotocatalíticas de degradación con colector solar y prueba de oscuridad

Para realizar la fotocatalisis fue necesario preparar en matraces de 1 L agua coloreada con azul terasil a 50 ppm y adicionar 45 mg de cada uno de los siete catalizadores para después dejarlos reposar en oscuridad por 24 horas, pasado el tiempo se toma una alícuota (Li) y después se llevan los matraces al colector solar

para poder ser adicionados en los tubos Pyrex (se hizo lo mismo con la muestra textil), para esto es necesario contar con un colector solar capaz de poder ubicarlo en exteriores con el fin de ahorrar energía utilizando la luz solar como fuente de luz UV y visible, mantener la forma de otros colectores con la capacidad de conservar en refrigeración y sellado para no perder la muestra ni el catalizador por evaporación.

El colector solar está construido con tubos Pyrex (borosilicato) de 36 mm de diámetro, 500 mm de longitud y 95% de transmisión UV, utilizado como reactor, un difusor de acuario para inyección de aire al interior del reactor; refrigerantes para evitar la evaporación de agua; bomba de agua marca Elitte Giant de 180 GPH utilizado en el sistema de refrigeración. Para este procedimiento se utilizó colorante azul terasil (azul disperso 60) y agua residual de una industria textil (muestra textil).

Procedimiento

1. Se utilizan dos muestras de aguas coloreadas, una sintética preparada con colorante azul terasil en una concentración de 50 ppm y tomar 500 mL; y otra muestra de 500 mL de agua residual de una industria textil con una concentración desconocida para cada catalizador (un total de 14 muestras y otras dos para el blanco de cada uno).
2. Agregar 45 mg de los diferentes catalizadores (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Erionita, Clinoptilolita, SiO_2 -Clinoptilolita, SiO_2 -Erionita) en la solución coloreada y mantener en agitación continua durante 4 horas en oscuridad.
3. Colocar el colector solar en una orientación Norte- Sur en un sitio adecuado para recibir la radiación solar.
4. Encender el flujo de aire, la bomba de recirculación y colocar la solución coloreada y el catalizador en los reactores.
5. Dejar funcionando el colector solar durante 6 h y tomar alícuotas de 10 mL de cada solución por cada hora transcurrida.
6. Analizar las muestras en espectrofotómetro UV-Visible y Fotómetro SQ118 (Merck).

2.4 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos

Para realizar la degradación biológica es necesario conocer los tipos de microorganismos capaces de degradar el colorante, como pueden ser las *Pseudomonas*, *Serratia*, *Enterobacter* y *Escherichia*. Se propuso utilizar 5 consorcios bacterianos compuestos por 7 diferentes bacterias (Tabla 14) con la finalidad de observar el mejor consorcio para degradar el colorante azul terasil. Seguir el siguiente procedimiento propuesto por Mendoza *et al.*, 2015.

2.4.1 Mantenimiento de cepas

Para hacer crecer los microorganismos a ser utilizados durante el experimento se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Obtener las bacterias de ensayos de biodegradación anteriores, para elegir el consorcio bacteriano adecuado.
- Preparar caldo Luria Bertani (LB) suficiente para disponer en 14 tubos de ensaye, para hacer crecer las bacterias por duplicado.
- Tomar 50 μL de las bacterias de ensayos anteriores y traspasarlas a los tubos de ensaye, dejar en incubación por 96h a 30°C.
- Llevar a centrifugar los tubos de ensaye a 8000 rpm por 15 min y retirar el sobrenadante, nuevamente resuspender en caldo LB.
- Preparar caldo LB en matraces de 250 ml y traspasar 50 μL de los tubos de ensaye resuspendidos, llevar a incubación por 5 días a 30°C. Llevar el sobrante de los tubos de ensaye a refrigeración.

Para realizar los consorcios bacterianos se utilizaron los matraces de 250 mL ya propagados con las 7 bacterias. En una campana de extracción con un nivel de seguridad apto para pasar cierta cantidad de caldo de los matraces a tubos falcón y ser llevados a centrifugación a 5000 rpm por 20 min; después de centrifugar todo el caldo de los 7 matraces se resuspende la biomasa obtenida nuevamente con caldo LB y llevar a refrigeración para su posterior uso en la formación de los consorcios.

2.4.2 Biodegradación de las muestras de residuos de fotocátalisis del colorante azul terasil y muestra textil

- Seleccionar las bacterias para formar los consorcios a ser utilizados.
- Inocular en 5 mL de los residuos con colorante azul terasil y muestra textil con 50 μ L de cada bacteria formadora de cada consorcio (Tabla 18).
- Incubar todas las muestras a 30°C por 7 días y seleccionar el consorcio que obtuvo el menor porcentaje de degradación del colorante.
- Propagar el consorcio final en caldo LB a 30°C por 5 días, posteriormente centrifugarlas a 8000 rpm por 20 minutos.
- Resuspender en el paquete celular 50 mL de residuo de descomposición fotocatalítica del colorante a biodegradar.
- Una vez terminada la prueba, centrifugar en su totalidad la muestra tratada para separar la muestra microbiana.
- Llevar la muestra centrifugada a evaluarse por espectroscopía UV-Vis para determinar la degradación del colorante.

2.5 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul terasil y muestra textil mediante espectrofotometría UV-Visible

Después de las pruebas fotocatalíticas con el colector solar y obtener alícuotas de las muestras, se llevan a refrigeración para hacer mediciones mediante espectroscopía UV-Visible. Hacer un barrido en la región de los 400 a 800 nm para determinar la disminución en la banda de absorción característica del colorante azul terasil encontrado a los 558 nm y para la muestra textil la cual tiene una banda de absorción característica en los 660 nm con la finalidad de determinar el porcentaje de degradación mediante las bandas de absorción y la observación en la disminución de las mismas.

Realizar una curva de calibración para el colorante azul terasil que inicie en 0 ppm hasta las 50 ppm que es la concentración más alta del colorante con los catalizadores. Después con los datos obtenidos en mediante espectroscopía UV-Vis observar el dato de absorbancia más alta (558 nm) y ubicarlo en la curva de calibración y hacerlo coincidir con el de la curva de calibración para conocer la concentración mediante interpolación.

Con la ecuación 1 determinar el porcentaje de degradación, después de tener los resultados de concentración en ppm para cada hora de la fotocatalisis.

En el caso de la muestra textil hacer lo mismo que con el colorante azul terasil, pero ahora a los 660 nm que es la banda de absorción para la muestra. Determinar el porcentaje de degradación mediante la ecuación 1.

$$\% \text{ Degradación} = \frac{C_0 - C}{C_0} * 100 \text{ _____ ecuación 1}$$

En la ecuación 1, C_0 se refiere a la concentración inicial del colorante (50 ppm); C se refiere a la concentración de cada catalizador después de la interpolación.

Capítulo 3 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la síntesis de los catalizadores por el método sol gel, su composición química elemental por medio del equipo JEOL JSM-6610 LV, así como la evaluación del desempeño catalítico de estos durante la fotocatalisis utilizando luz solar, se presentará de igual forma la degradación del colorante utilizando la espectrofotometría UV-Visible por medio del equipo UV-Visible y Fotómetro SQ118 (Merck) mostrándose como la disminución en la línea de la absorbancia a distintas horas, también se presentara el uso de microorganismos como *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Escherichia coli*, etc. para degradar el colorante después de la fotocatalisis y la concentración de este al finalizar los experimentos.

3.1 Composición química elemental de los catalizadores

Con los datos obtenidos del análisis de cada catalizador se elaboró la Tabla 10 para analizar la composición elemental expresada en % en peso. Los resultados que se pueden observar en la Tabla 11 son adecuados para el TiO_2 , SiO_2 y Al_2O_3 que concuerdan con los esperados, debido a que la composición elemental obtenida del análisis nos permite verificar que los catalizadores se encuentran en las proporciones establecidas por el método de síntesis y por consiguiente nos dice que el proceso de síntesis fue adecuado Masuda *et al.* (1990) y Bedolla *et al.* (2015); de igual manera el análisis nos permitió conocer que los catalizadores mencionados no tuvieron impurezas o elementos que pudieran afectar los procesos siguientes, como se puede observar para el TiO_2 no tiene ningún elemento diferente al igual que para el SiO_2 y el Al_2O_3 , para el SiO_2 con Erionita podemos observar presencia de hierro, sodio, aluminio, potasio y calcio, para el SiO_2 con Clinoptilolita no hay presencia de potasio pero si de carbono, para las dos zeolitas naturales se puede observar que ambas poseen los mismos componentes químicos como oxígeno, silicio, sodio, aluminio, potasio, calcio, magnesio y hierro, y en diferencia con sus combinaciones no contienen carbono.

Tabla 10 Composición química elemental de los catalizadores, expresada en % en peso (elaboración propia).

Catalizador	Elementos											Total
	O	Ti	Si	F	Na	Al	K	Ca	C	Mg	Fe	
TiO ₂	89.95	10.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
SiO ₂	53.26	-	46.74	-	-	-	-	-	-	-	-	100
SiO ₂ - Erionita	45.00	-	31.67	20.14	1.14	1.65	0.22	0.19	-	*	*	100
SiO ₂ - Clinoptilolita	44.93	-	29.76	14.33	0.50	0.77	*	0.30	9.41	*	*	100
Erionita	48.82	-	33.42	-	3.43	8.36	2.14	1.52	-	1.10	1.20	100
Clinoptilolita	48.92	-	34.69	-	3.62	6.79	1.62	1.60	-	0.92	1.84	100
Al ₂ O ₃	47.07	-	-	-	-	52.93	-	-	-	-	-	100

3.2 Pruebas de fotocátalisis con el colector solar

Estas pruebas se iniciaron con la prueba de oscuridad que se realiza, ya que los catalizadores utilizados son materiales porosos y se desea saber si dentro de su estructura se pueden adsorber moléculas del colorante. Esto representaría una disminución de la absorbancia en el análisis UV-Vis. Si no hay adsorción dentro de la estructura de los catalizadores, la concentración del colorante ha permanecido invariable o ligeramente disminuida. Después de estas pruebas se utilizó un colector solar ya descrito en la sección de metodología (Figura 26). Se tomaron 7 alícuotas (Tabla 11) de los 9 catalizadores para la muestra textil y el colorante azul terasil, haciendo un total de 63 muestras (Tabla 12), las pruebas de degradación catalítica con luz solar se realizaron en un horario desde las 9 am a las 3 pm de la 1^a quincena de julio a la 2^a quincena de agosto del año 2018, en un periodo pre otoñal y se tomo una alícuota durante cada hora transcurrida, tomando la mayor cantidad de luz solar y radiación UV. En la Tabla 12 se muestra la nomenclatura

para el colorante azul terasil, para la muestra textil es lo mismo, pero poniendo en lugar de AT un MT.



Figura 26 Colector solar utilizado para la fotocatalisis

Tabla 11 Descripción de las alícuotas tomadas durante el experimento de fotocatalisis.

Muestra	Descripción
L _i	Alícuota de colorante azul terasil a 50 ppm antes de las 24 h de oscuridad.
L ₀	Alícuota tomada a las 24 h de oscuridad.
L ₁	Alícuota tomada a la hora 1 de la fotocatalisis.
L ₂	Alícuota tomada a la hora 2 de la fotocatalisis.
L ₃	Alícuota tomada a la hora 3 de la fotocatalisis.
L ₄	Alícuota tomada a la hora 4 de la fotocatalisis.
L ₅	Alícuota tomada a la hora 5 de la fotocatalisis.
L ₆	Alícuota tomada a la hora 6 de la fotocatalisis.

Tabla 12 Nomenclatura utilizada para las alícuotas con el catalizador correspondiente

Catalizador	Nomenclatura	Catalizador	Nomenclatura
TiO ₂	AT-TiO ₂ L ₀	SiO ₂	AT-SiO ₂ L ₀
	AT-TiO ₂ L ₁		AT-SiO ₂ L ₁
	AT-TiO ₂ L ₂		AT-SiO ₂ L ₂
	AT-TiO ₂ L ₃		AT-SiO ₂ L ₃
	AT-TiO ₂ L ₄		AT-SiO ₂ L ₄
	AT-TiO ₂ L ₅		AT-SiO ₂ L ₅
	AT-TiO ₂ L ₆		AT-SiO ₂ L ₆
Clinoptilolita (Z17)	AT-Clinoptilolita L ₀	SiO ₂ - Z17	AT-SiO ₂ -Clinoptilolita L ₀
	AT- Clinoptilolita L ₁		AT-SiO ₂ -Clinoptilolita L ₁
	AT- Clinoptilolita L ₂		AT-SiO ₂ - Clinoptilolita L ₂
	AT- Clinoptilolita L ₃		AT-SiO ₂ - Clinoptilolita L ₃
	AT- Clinoptilolita L ₄		AT-SiO ₂ - Clinoptilolita L ₄
	AT- Clinoptilolita L ₅		AT-SiO ₂ - Clinoptilolita L ₅
	AT- Clinoptilolita L ₆		AT-SiO ₂ - Clinoptilolita L ₆
Erionita	AT-ErionitaL ₀	SiO ₂ -Eri	AT-SiO ₂ -Eri onitaL ₀
	AT-ErionitaL ₁		AT-SiO ₂ -Erionita L ₁
	AT-Erionita L ₂		AT-SiO ₂ -Erionita L ₂
	AT-Erionita L ₃		AT-SiO ₂ -Erionita L ₃
	AT-Erionita L ₄		AT-SiO ₂ -Erionita L ₄
	AT-Erionita L ₅		AT-SiO ₂ -Erionita L ₅
	AT-Erionita L ₆		AT-SiO ₂ -Erionita L ₆
Blanco	AT-Blanco L ₀	Al ₂ O ₃	AT-Al ₂ O ₃ L ₀
	AT-Blanco L ₁		AT-Al ₂ O ₃ L ₁
	AT-Blanco L ₂		AT-Al ₂ O ₃ L ₂
	AT-Blanco L ₃		AT-Al ₂ O ₃ L ₃
	AT-Blanco L ₄		AT-Al ₂ O ₃ L ₄
	AT-Blanco L ₅		AT-Al ₂ O ₃ L ₅
	AT-Blanco L ₆		AT-Al ₂ O ₃ L ₆

En las Figuras 27 a la 30 se muestran las imágenes de las alícuotas tomadas durante la catálisis con luz solar a los diferentes catalizadores para el colorante azul terasil y en la Tabla 14 para la muestra textil, debido a que el colector solar

solo tiene espacio para 5 muestras el experimento se llevó a cabo en 4 días. Las alícuotas tomadas durante estos días se llevaron a refrigeración para ser medidas posteriormente al término de todo el experimento de fotocatalisis.

Puede observarse a los catalizadores que realizan una mayor disminución de color en la muestra de los cuales son el TiO_2 (Figura 27) en el cual se puede observar que el mayor cambio se da en la última hora, observándose casi sin coloración la muestra; otro catalizador capaz de disminuir el color de la muestra fue el dióxido de silicio con Clinoptilolita (Figura 28) el cual se observa una disminución durante cada hora; mientras que la decoloración con la alúmina (Figura 30) se observa que no hubo una disminución sino hasta la última hora en la cual se observa una disminución importante de color; el catalizador que disminuyo el color en la muestra con el colorante azul terasil fue la Erionita (Figura 29) en la que se observa el mismo color en todas las alícuotas; el dióxido de silicio así como la Erionita no muestra gran disminución en el color pero la combinación de estas disminuye el color aunque no como el dióxido de titanio o la combinación del dióxido de silicio con Clinoptilolita.



Figura 27 Alícuotas del TiO_2 después de la fotocatalisis para el colorante AT.



Figura 28 Alícuotas para SiO_2 Clinoptilolita después de la fotocatalisis para el colorante AT.



Figura 29 Alícuotas para la Erionita después de la fotocatalisis para el colorante AT.



Figura 30 Alícuotas para Al_2O_3 después de la fotocatalisis para el colorante AT

En las Figuras 31 a 34 se observan los catalizadores con mayor disminución de colorante de derecha a izquierda, como se muestra en la Figura 31 la Erionita es el catalizador con mayor disminución de color que se observa desde la primera hora; el dióxido de silicio hizo una disminución del color en la muestra textil pero no hasta la cuarta hora donde se observa un color claro (véase Figura 32), mientras que la zeolita Clinoptilolita también hace una disminución en el color observándose en la Figura 33; todos los demás catalizadores disminuyeron el color de la muestra alrededor de la cuarta hora, más no tanto como el SiO_2 ; la alúmina sin embargo fue el catalizador con menor disminución de color como se puede observar en la Figura 34.



Figura 31 Alícuotas para la Erionita después de la fotocatalisis de la muestra textil.



Figura 32 Alícuotas para el SiO_2 después de la fotocatalisis de la muestra textil.



Figura 33 Alícuotas para la Clinoptilolita después de la fotocatalisis de la muestra textil.



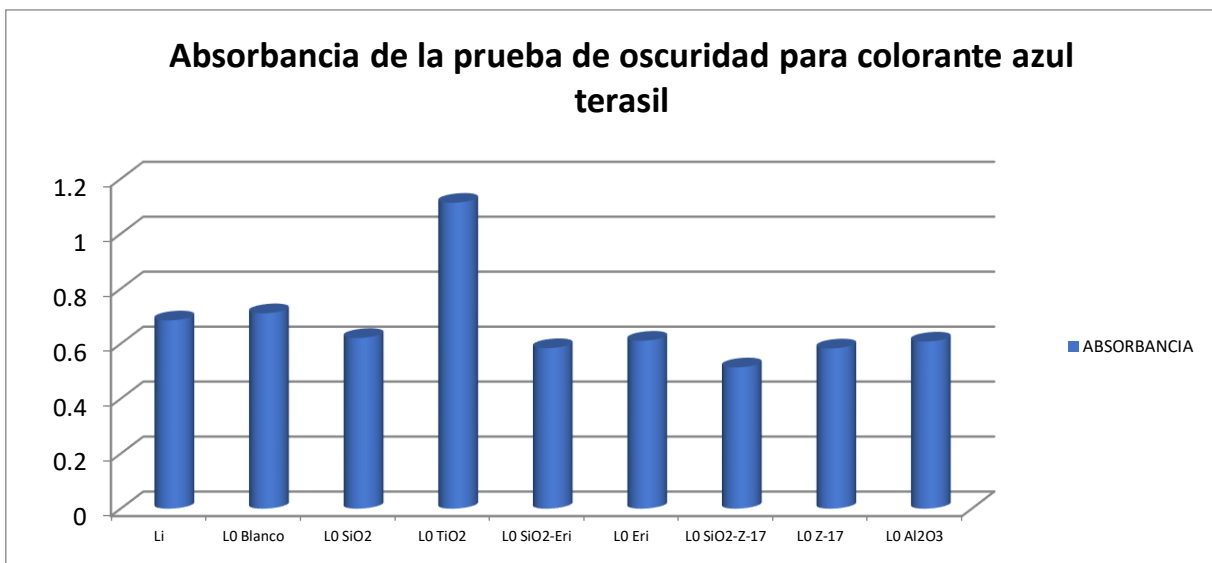
Figura 34 Alícuotas para Al_2O_3 después de la fotocatalisis para la muestra textil.

3.3 Evaluación del porcentaje de degradación del colorante azul terasil mediante espectroscopía UV-Visible

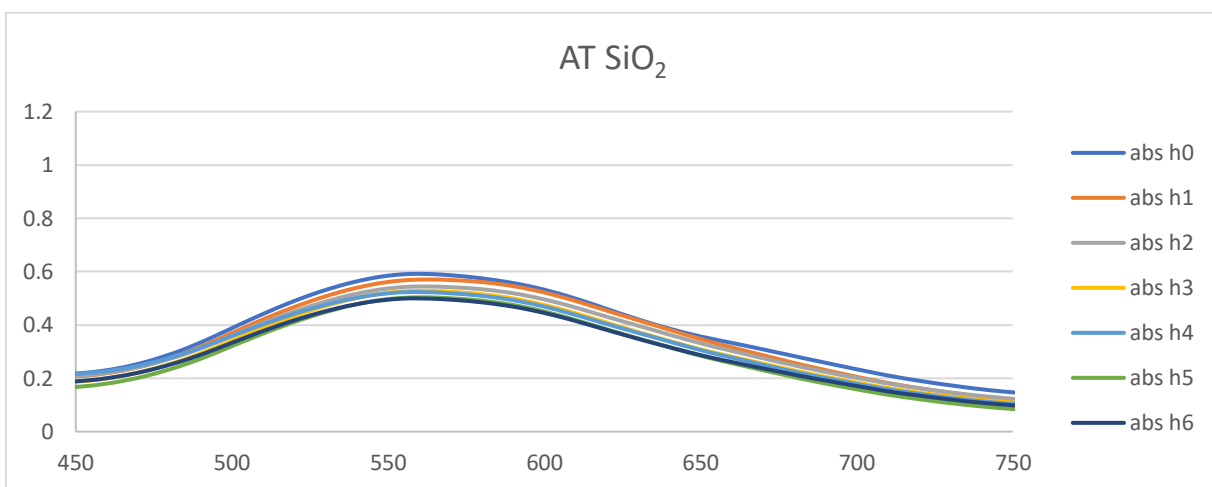
Para evaluar la degradación del colorante se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible Perkin Elmer Lambda 20 que permite obtener el espectro de las muestras a analizar, se hizo un barrido desde los 400nm a los 800 nm, se determinó mediante el espectrofotómetro UV-Vis la absorbancia máxima para el colorante azul terasil y la muestra textil que tienen un máximo de absorción a los 558 nm y 662 nm respectivamente los cuales se eligieron para evaluar la degradación.

En la Gráfica 1 se muestra la absorbancia del colorante azul terasil después de las 24 h de oscuridad obteniendo un valor en la absorbancia de 0.685 nm, después de las 24 horas de oscuridad se tiene una absorbancia de 0.685 nm, también se observa un valor de 514 nm para el catalizador SiO_2 -Clinoptilolita el cual tuvo una disminución del colorante por un proceso de adsorción del color de la muestra, y una disminución mínima para todos los demás catalizadores a excepción de la Erionita que muestra una absorbancia igual a la muestra inicial, el óxido de titanio aumento casi el doble en la absorbancia transcurrido este tiempo (0.98nm), esto debido a que al ser adicionado cambia el color de la muestra y la vuelve más oscura.

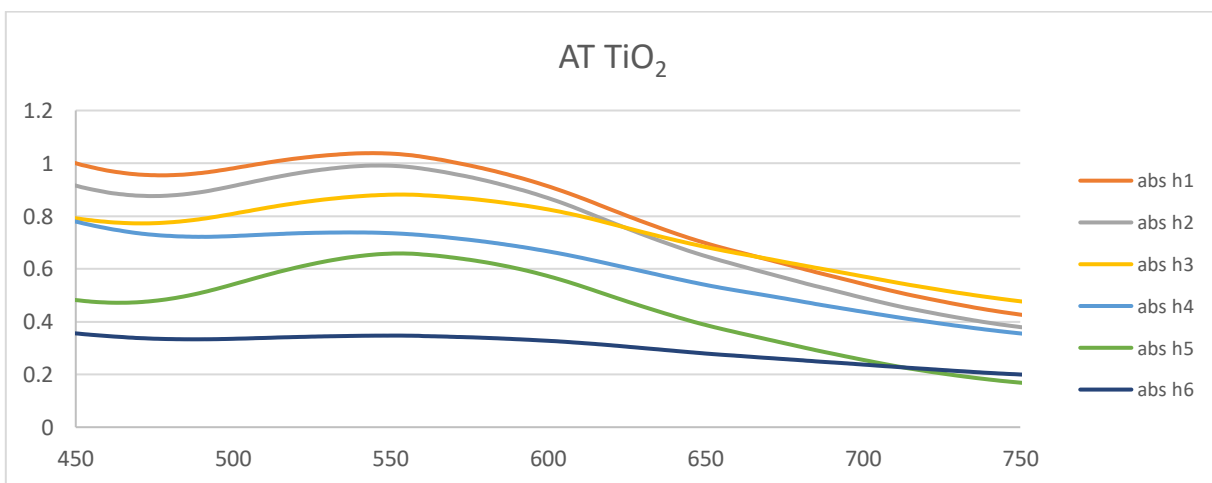
Para el colorante azul terasil a 50 ppm con su blanco y los 7 catalizadores se observan los siguientes resultados mostrados en las Graficas 2 a la 9, que muestra los espectros UV-Vis para las seis alícuotas tomadas cada hora que duró la fotocatalisis.



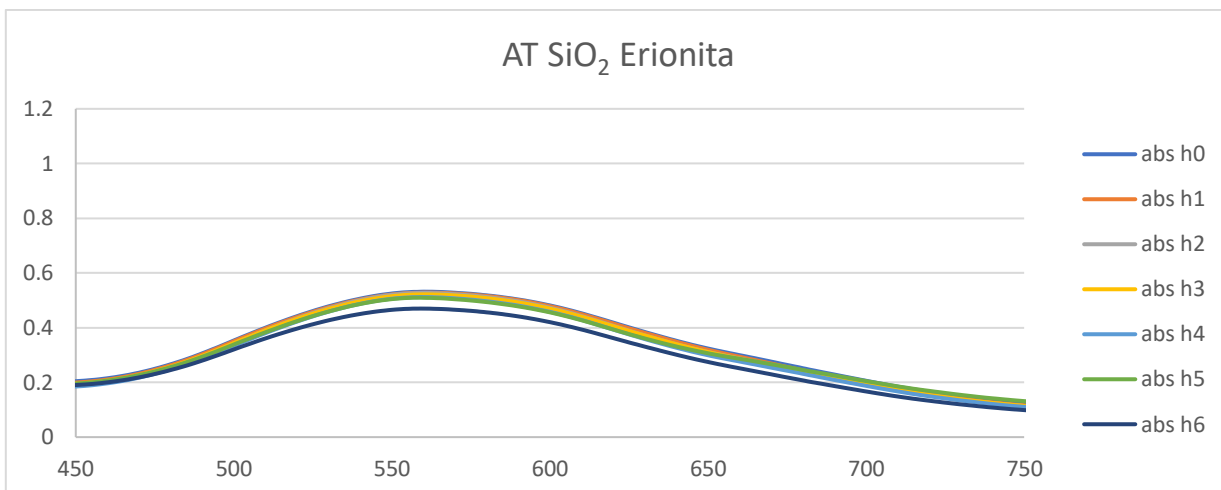
Gráfica 1 Absorbancia de los catalizadores después de las 24 h de oscuridad



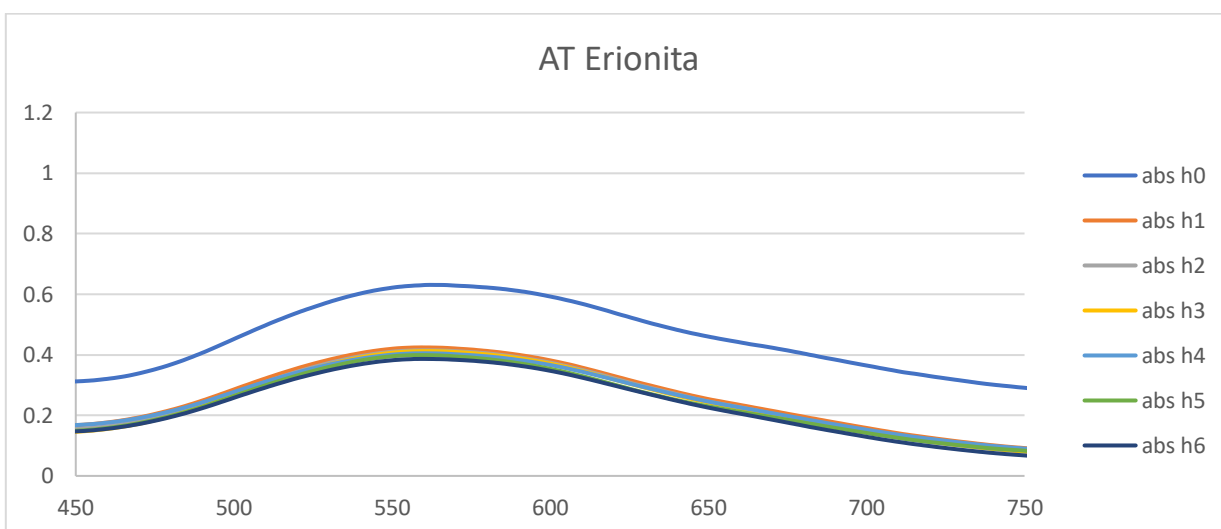
Gráfica 2 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO₂



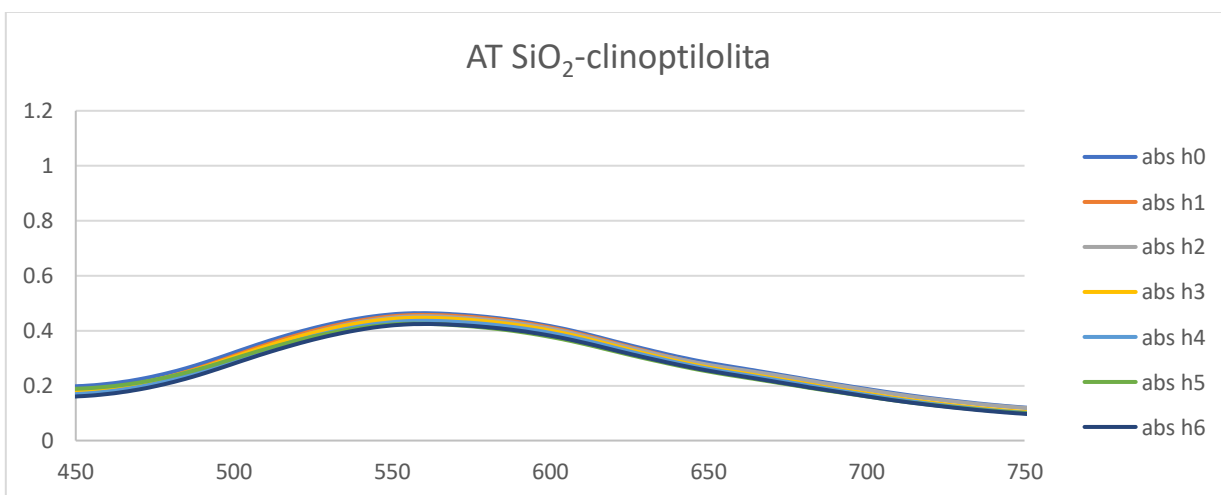
Gráfica 3 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con TiO₂



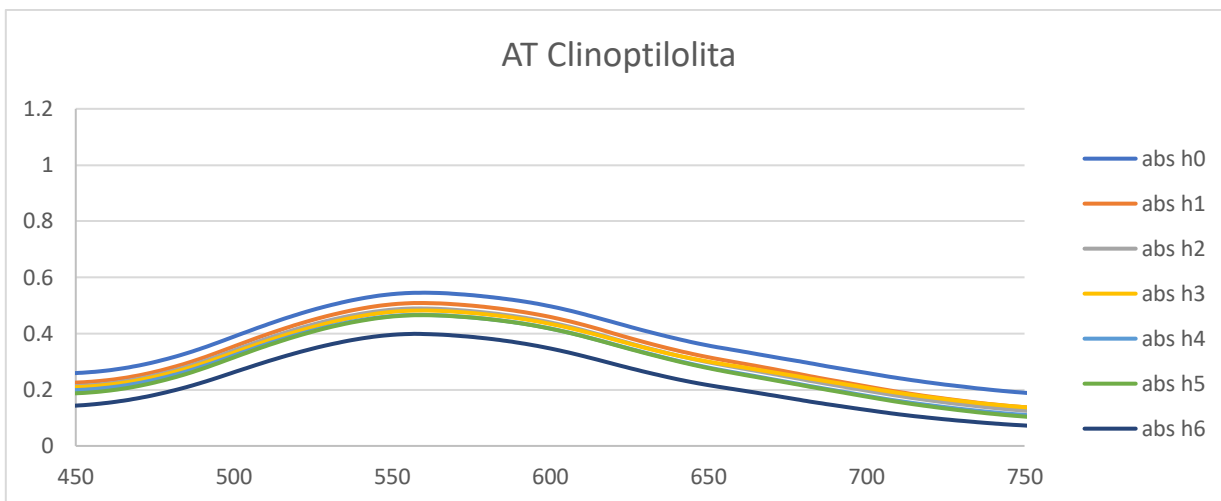
Gráfica 4 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO_2 /Erionita



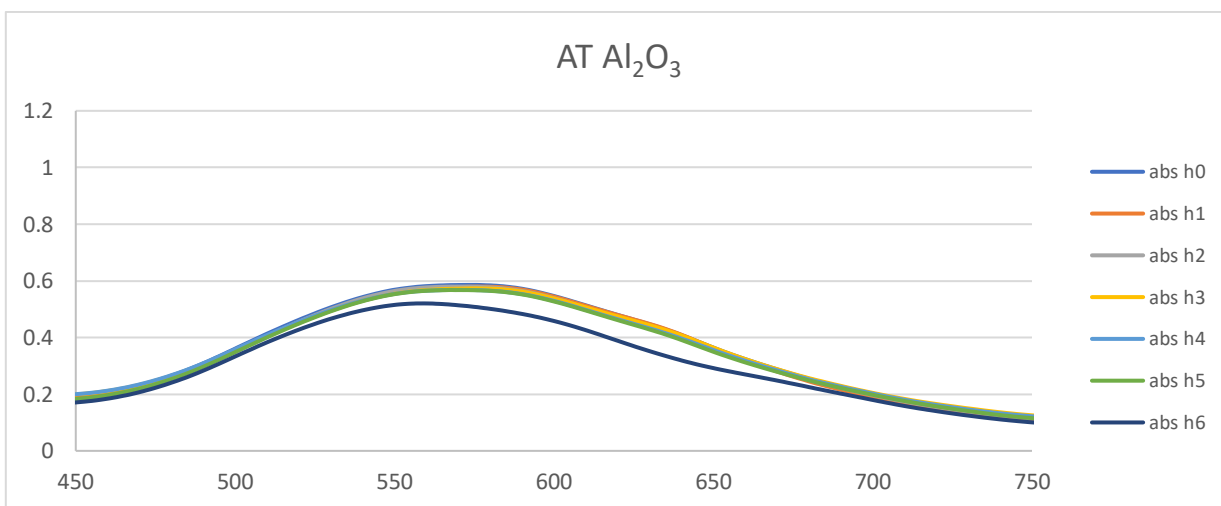
Gráfica 5 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Erionita



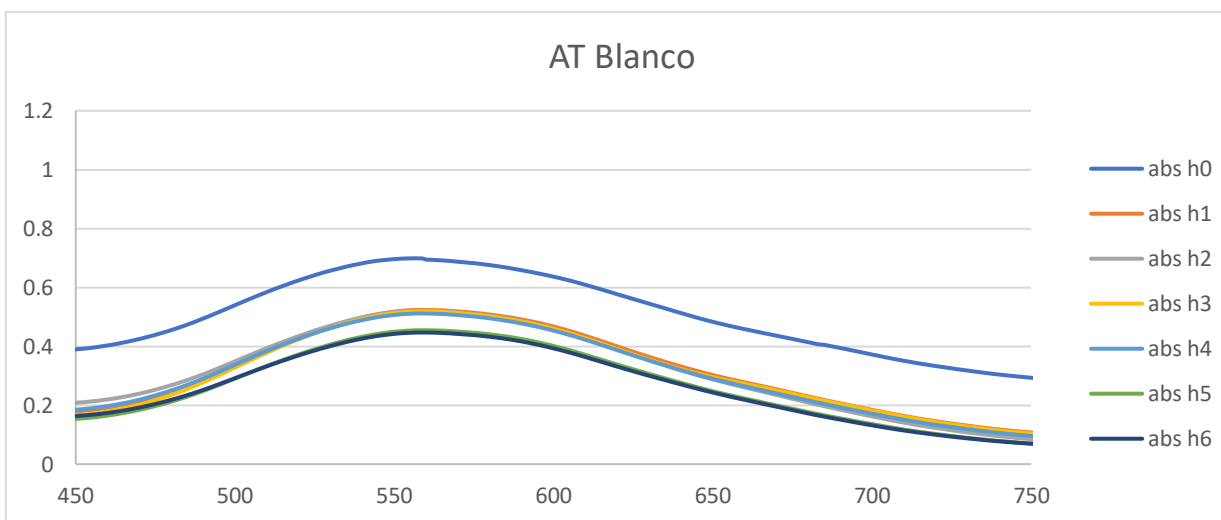
Gráfica 6 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con SiO_2 con Clinoptilolita



Gráfica 7 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Clinoptilolita



Gráfica 8 Espectro UV-VIS del colorante azul terasil con Al_2O_3



Gráfica 9 Espectro UV-VIS del blanco del colorante azul terasil

La Gráfica 2 presenta los espectros de absorción Uv-Vis del catalizador SiO₂. Durante las 6 horas de proceso fotocatalítico se observa una ligera disminución de la banda de absorción característica del azul terasil manteniendo la forma del espectro original de la solución coloreada.

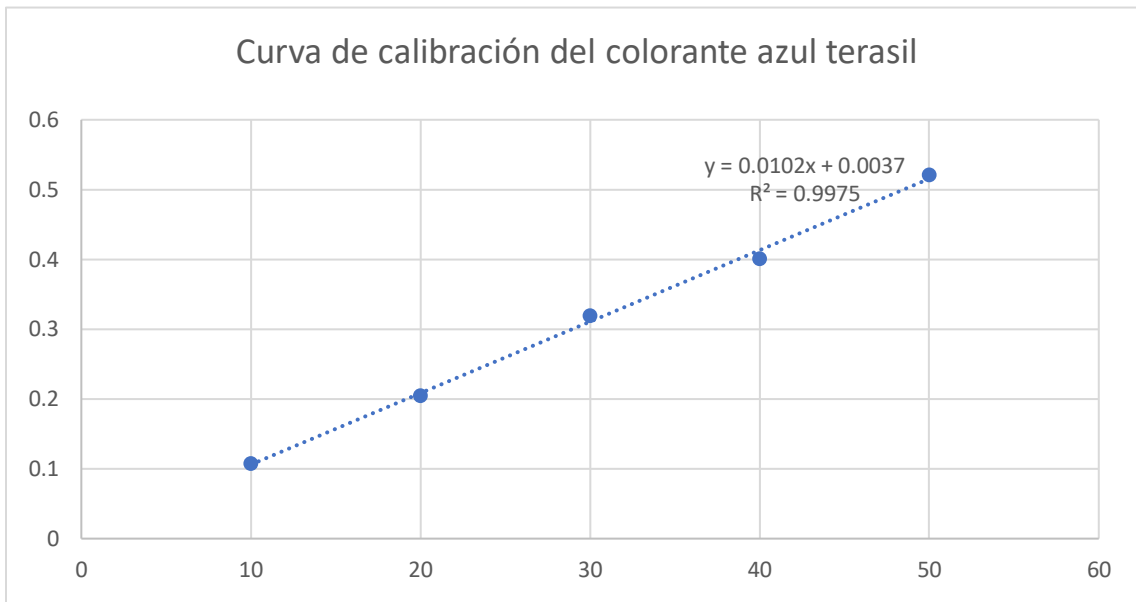
El desempeño fotocatalítico del TiO₂ se presenta en la Gráfica 3, dónde se observa una disminución de la banda de absorción del colorante y un aplanamiento de la curva. Lo anterior se interpreta como una degradación total del colorante al llegar a la sexta hora de exposición a la luz solar.

Las Gráficas 4, 5 y 6 presentan los espectros de absorción de las pruebas fotocatalíticas con los catalizadores SiO₂-Erionita, Erionita y SiO₂-Clinoptilolita, respectivamente. En estos casos no hay un cambio importante en la forma de la curva, ni una disminución de la absorbancia que indique la degradación del colorante. Para el proceso con Erionita se observa un aumento de la absorbancia en la hora 4, esto puede ser por la evaporación de la solución acuosa. Lo anterior también se observa en la Gráfica 9, del Blanco lo que puede haber ocurrido por evaporación o fuga en el fotorreactor de la solución acuosa.

Las Gráficas 7 y 8 presentan los espectros de absorción UV-Vis de los catalizadores Clinoptilolita y alúmina, respectivamente. En el primer caso se observa una ligera disminución en la absorbancia sin llegar al aplanamiento de la curva del colorante. Para la alúmina, únicamente se observa una ligera disminución de la absorbancia en la hora 6.

3.4 Determinación del porcentaje de biodegradación después de la fotocatalisis

La curva de calibración para el colorante azul terasil (véase Gráfica 10) se determinó con el mismo equipo de espectroscopía UV-Vis, con la función de curva de calibración, haciendo los parámetros de concentración a 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm y 50 ppm de estos datos se obtuvieron los resultados de concentración de las alícuotas para cada hora de la fotocatalisis y de esta forma determinar los datos de % de degradación mediante la Ecuación 1 ya descrita en el apartado de metodología.



Gráfica 10 Curva de calibración del colorante azul terasil

Puede observarse en la Gráfica 10 que la curva de calibración mantiene una línea recta con un R^2 de 0.9975 lo cual significa que existe un error mínimo de 3 milésimas, por medio de esta se obtuvieron los resultados por interpolación, aunque como ya se dijo el espectrofotómetro UV-Vis (Perkin Elmer Lambda 20) da los valores de concentración de las alícuotas para el colorante azul terasil haciendo su curva de calibración dentro del equipo, esto no se puede hacer para la muestra textil puesto que no se conoce la concentración de los colorantes, aunque se hace una curva de dilución que será utilizada con el fin de conocer la concentración. Cabe destacar que la hora -1 es la alícuota tomada antes de las 24h de oscuridad y la hora 0 es la alícuota tomada a las 24h de oscuridad, las horas siguientes son las alícuotas tomadas durante cada hora de la fotocatalisis.

En la Gráfica 11 se muestra el porcentaje de degradación para el colorante azul terasil con sus respectivos catalizadores; comenzando con el blanco se observa que este colorante obtuvo una degradación durante las 24 horas de oscuridad del 20%, además de que es muy afectado por la luz solar ya que el porcentaje de degradación al final de la fotocatalisis es de casi 40%.

Para el catalizador SiO_2 se aprecia una degradación lenta durante el transcurso de la fotocatalisis y después de la cuarta hora aumenta la degradación hasta tener un valor al final del 31%.

El catalizador SiO_2 -Erionita obtuvo una degradación muy lenta durante el transcurso del tiempo, solo pudo reducir el colorante en un 29%, lo que nos dice que el catalizador no tiene un efecto importante en la degradación fotocatalítica del colorante.

Para el SiO_2 -Clinoptilolita comenzó la degradación desde la prueba de oscuridad en la que se obtuvo un valor de 26.4% y con el transcurso del tiempo de la fotocatalisis se degrada más el colorante hasta tener en la última hora un porcentaje de degradación del 45.1% obteniendo un catalizador con alta eficacia de degradación comparada con el resto de los catalizadores.

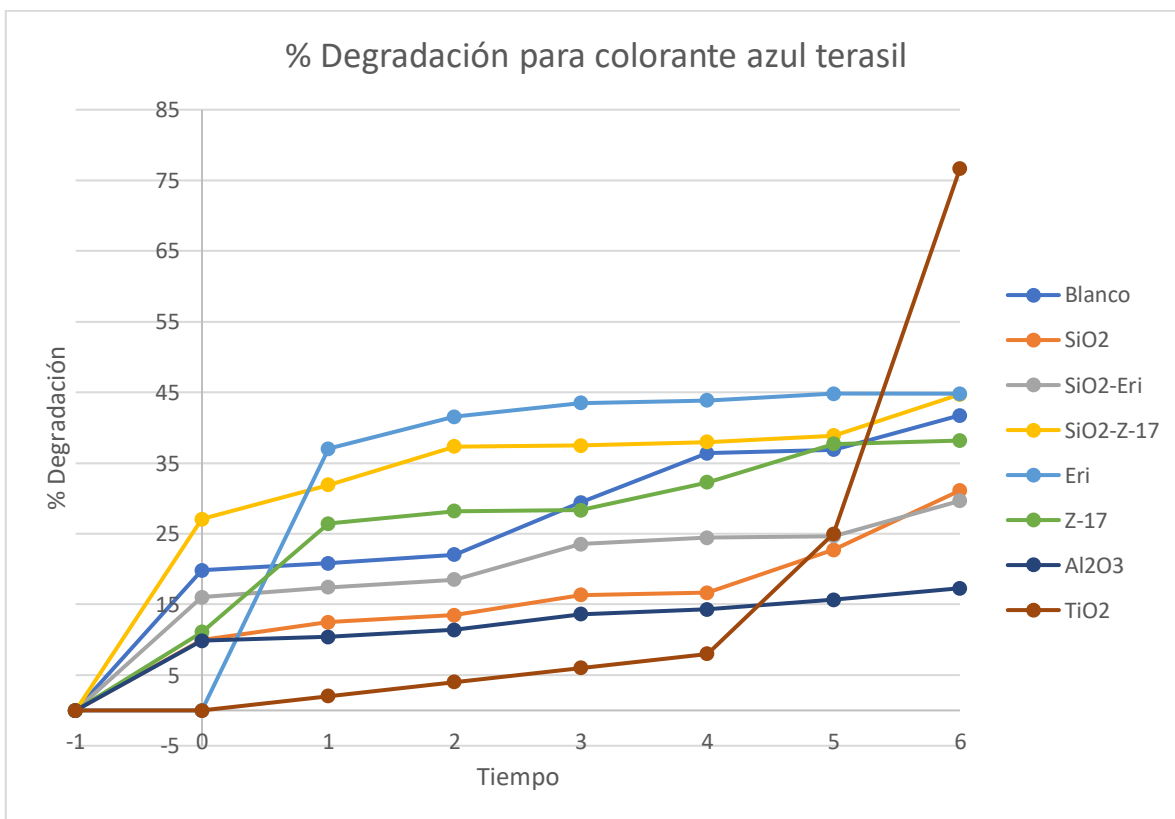
Para la zeolita natural Erionita se obtuvo una degradación muy acelerada al comienzo de la fotocatalisis como puede observarse en la Gráfica 11 y durante la primera hora se degrada un 36%, sin embargo durante la prueba de oscuridad no se encontró ningún cambio y durante el transcurso de las horas se da un aumento en la degradación del colorante al 46%, lo que nos habla de un catalizador con posibilidad de aplicarse para la degradación fotocatalítica del colorante.

Para la otra zeolita natural Clinoptilolita los datos obtenidos durante la hora cero al tener un porcentaje de disminución del 10% de la concentración del colorante debido a una posible adsorción de las moléculas en la estructura porosa del catalizador durante la prueba de oscuridad y con el transcurso del tiempo se observa el aumento en el porcentaje de degradación obteniendo al final de la fotocatalisis un 37% de degradación del color.

En cuanto a la degradación del color con el catalizador Al_2O_3 se puede apreciar una disminución durante la prueba de oscuridad del 9%, a partir de que comienza la fotocatalisis no se ve un cambio en la disminución del color, sin embargo para el dato obtenido al final del experimento se obtuvo una degradación del 16%, siendo este el catalizador con menor disminución del colorante azul terasil.

El catalizador con mayor eficiencia para la degradación del colorante azul terasil fue el TiO_2 en la Gráfica 11 el cuál durante las primeras horas no presenta ningún cambio en la degradación del color siendo del 7% y al paso de la quinta hora ya se tiene una disminución del color del 25%, al cabo de la sexta hora la degradación fue de casi el 80% obteniendo la mejor degradación del colorante.

Como se puede observar en la Gráfica 11 el mejor catalizador fue el TiO_2 con un porcentaje de degradación de 77.4%, seguido por la zeolita natural Erionita la cual disminuyo el color 46% y del catalizador SiO_2 el cual tuvo una degradación del 45.1%; sin en cambio la alúmina fue el catalizador con menor disminución del colorante azul terasil del 16%, mucho menor que el blanco, el cual obtuvo una degradación de casi el 40% al término de la fotocatalisis.

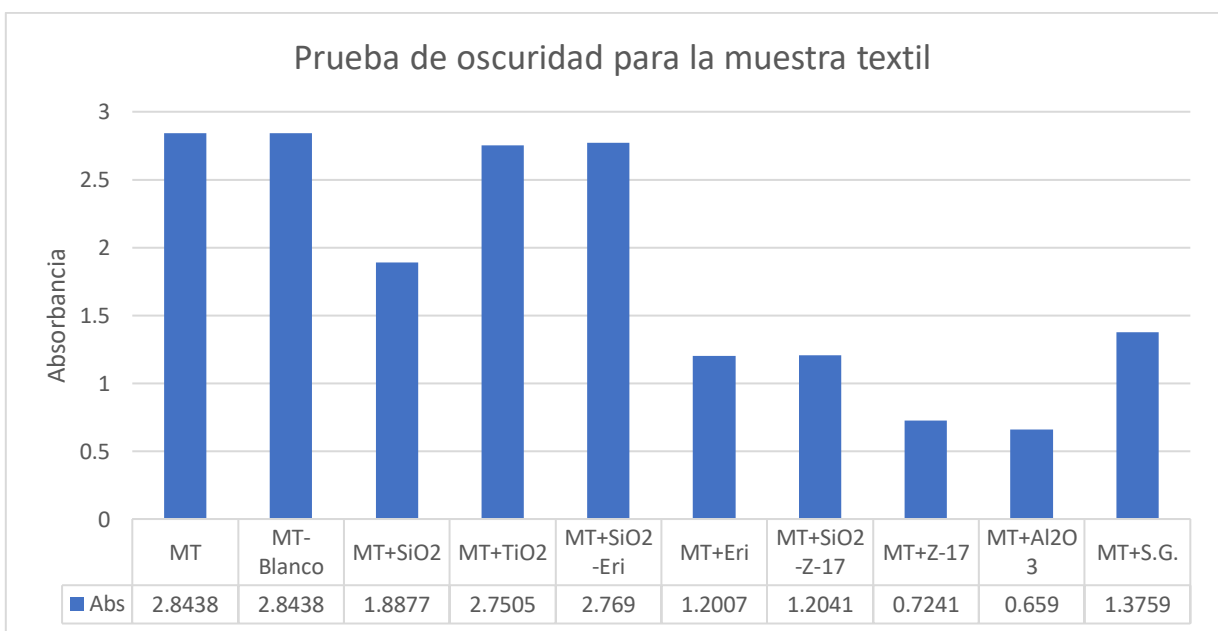


Gráfica 11 % Degradación para el colorante azul terasil con cada catalizador

3.5 Evaluación del porcentaje de degradación de la muestra textil mediante espectroscopía UV-Visible

Para evaluar la degradación de la muestra textil se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible (Perkin Elmer Lambda 20) que permite obtener el espectro de las muestras a analizar, se hizo un barrido desde los 400 nm a los 800 nm, se realizaron barridos para conocer la longitud de onda donde tiene su mayor absorbancia, la muestra textil utilizada en el experimento tiene su máximo en los 662 nm.

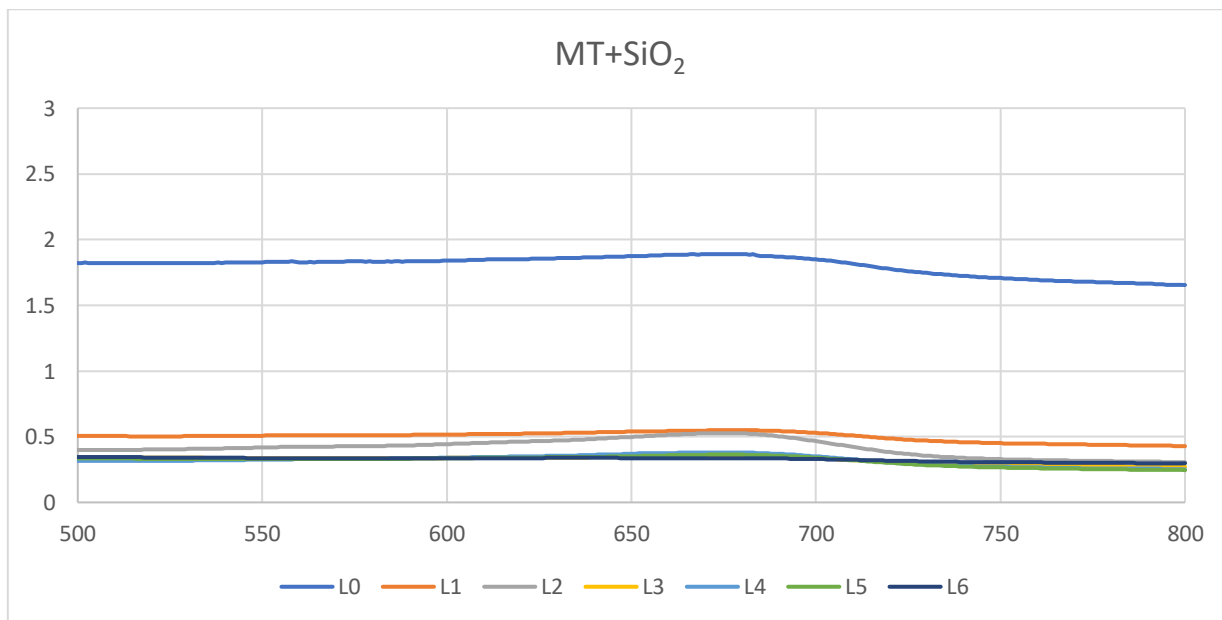
En la Gráfica 12 se muestra la prueba de oscuridad para la muestra textil con los 7 catalizadores, la Clinoptilolita obtuvo una posible adsorción del color dentro de sus poros durante la prueba de oscuridad, al igual que la Al_2O_3 que obtuvo el valor más bajo de absorbancia; la Erionita obtuvo un valor de 1.2 al igual que el SiO_2 -Clinoptilolita, aunque por lo contrario el TiO_2 y el SiO_2 -Eri no disminuyeron la absorbancia. Como se puede apreciar en la Gráfica 12, la absorbancia para la muestra textil llega hasta un valor de 2.8438 muy por encima del colorante azul terasil a 50 ppm, lo que nos hace darnos cuenta que la concentración de colorantes de la muestra es grande.



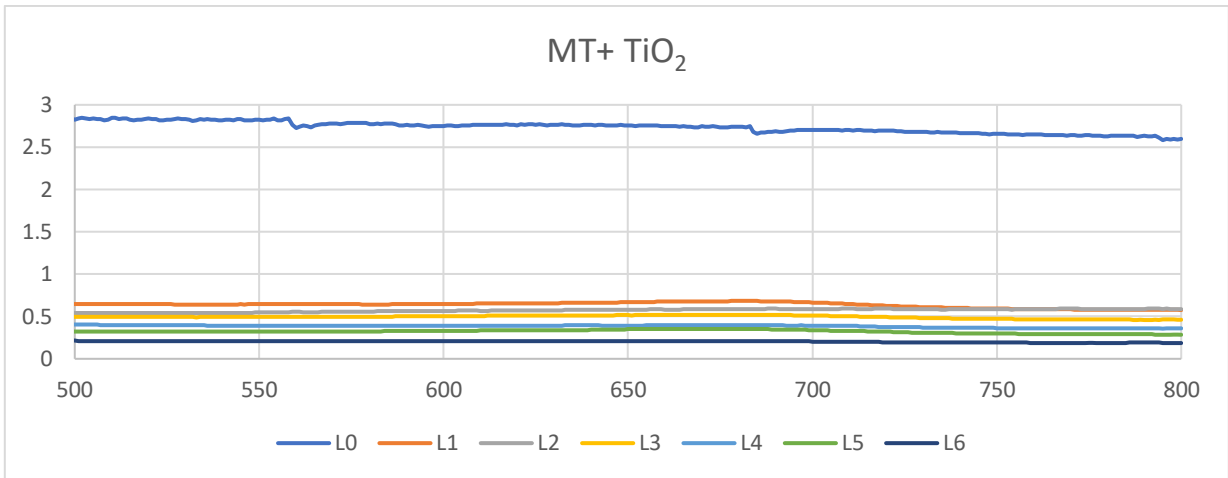
Gráfica 12 Prueba de oscuridad para la muestra textil con los 7 catalizadores

En las Gráficas 13, 14, 15, 17, 18 y 19 se presentan los espectros de absorción UV-Vis de las pruebas de degradación de la muestra textil con los catalizadores SiO_2 , TiO_2 , SiO_2 -Erionita, SiO_2 -Clinoptilolita, Clinoptilolita, Alúmina, respectivamente. En estos no se observa una curva de absorción definida, ya que se presenta una línea recta con absorbancias por arriba de 2 para los tres primeros y menor a 1 para los tres últimos. En todos los casos se observa una disminución gradual de la absorbancia desde el inicio de las pruebas hasta llegar a valores cercanos a cero a la hora 6 del proceso. Lo anterior es interpretado como una degradación favorable de los colorantes presentes en la muestra textil.

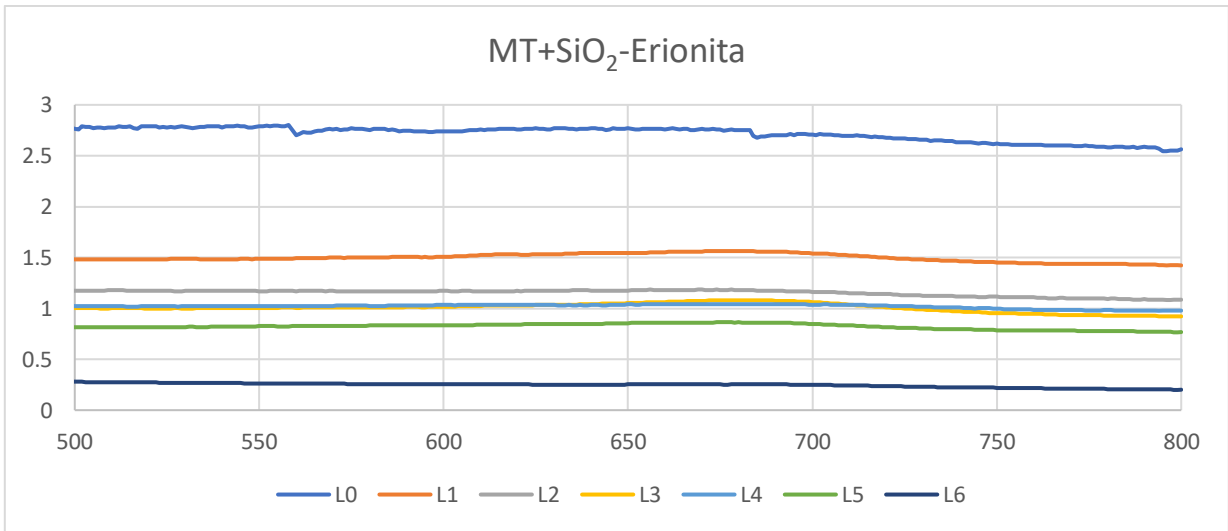
En las Gráficas 16 y 20, de las pruebas con los catalizadores Erionita y el banco, respectivamente. Se observa una banda de absorción bien formada desde los 500 a los 700 nm que representa a la mezcla de colorantes que contiene la muestra de agua residual textil. En ambos casos se observa una disminución de la absorbancia sin que se cambie la forma de dicha curva, lo que indica una disminución en la concentración de la concentración inicial de los colorantes presentes sin llegar a la desaparición total.



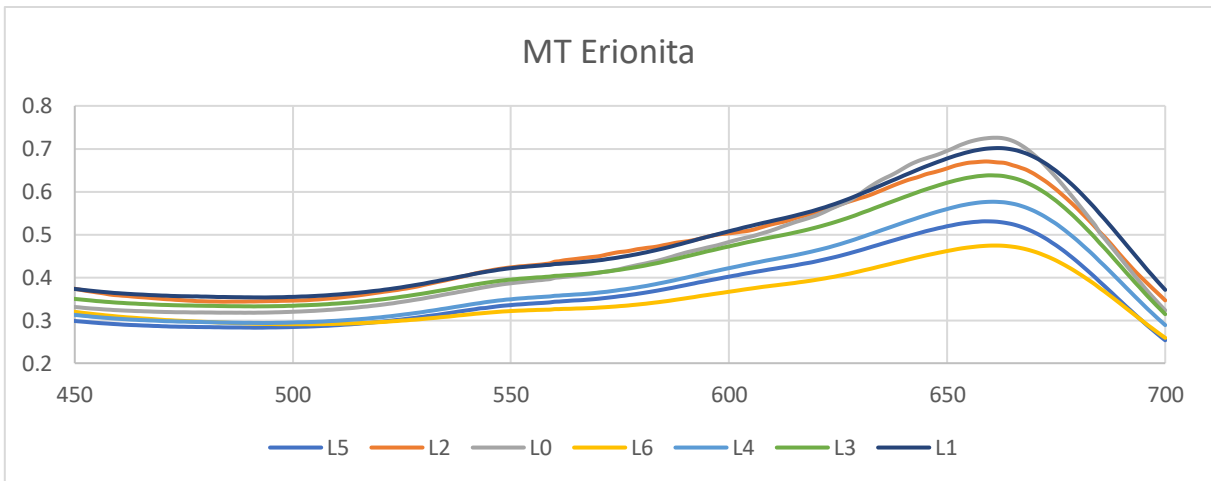
Gráfica 13 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO_2



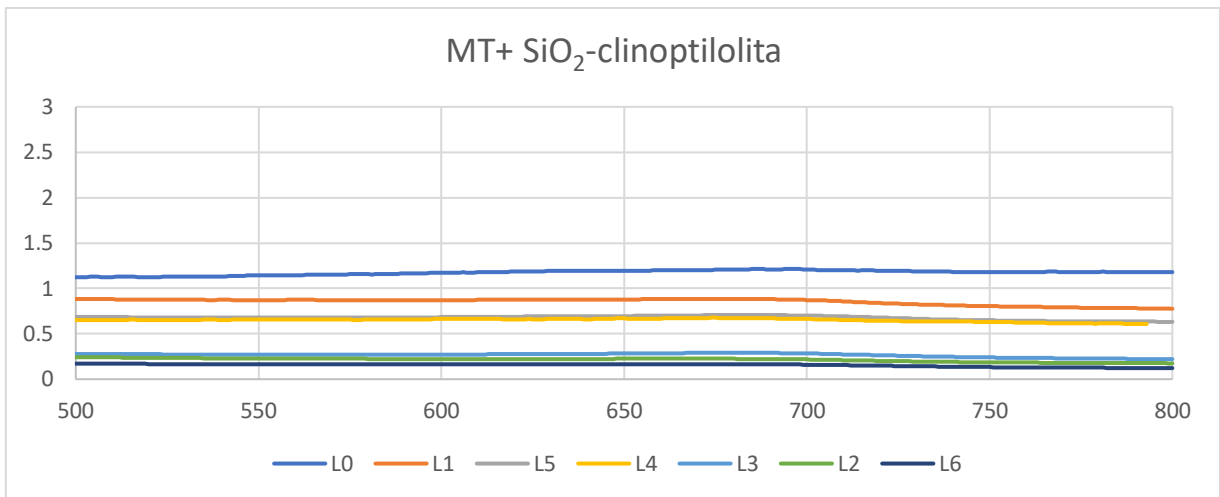
Gráfica 14 Espectro UV-VIS de la muestra textil con TiO₂



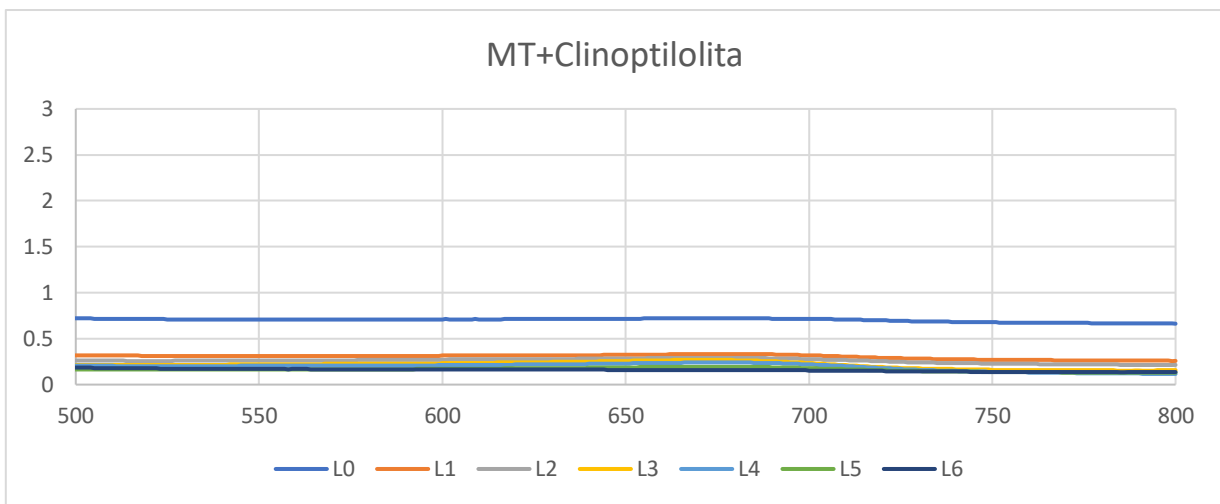
Gráfica 15 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO₂-Erionita



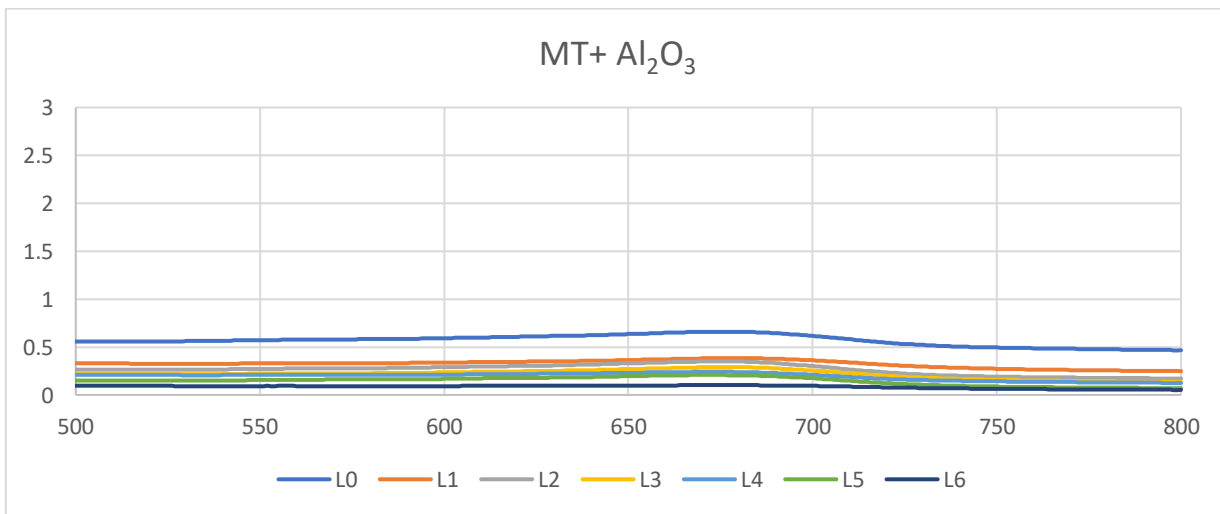
Gráfica 16 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Erionita



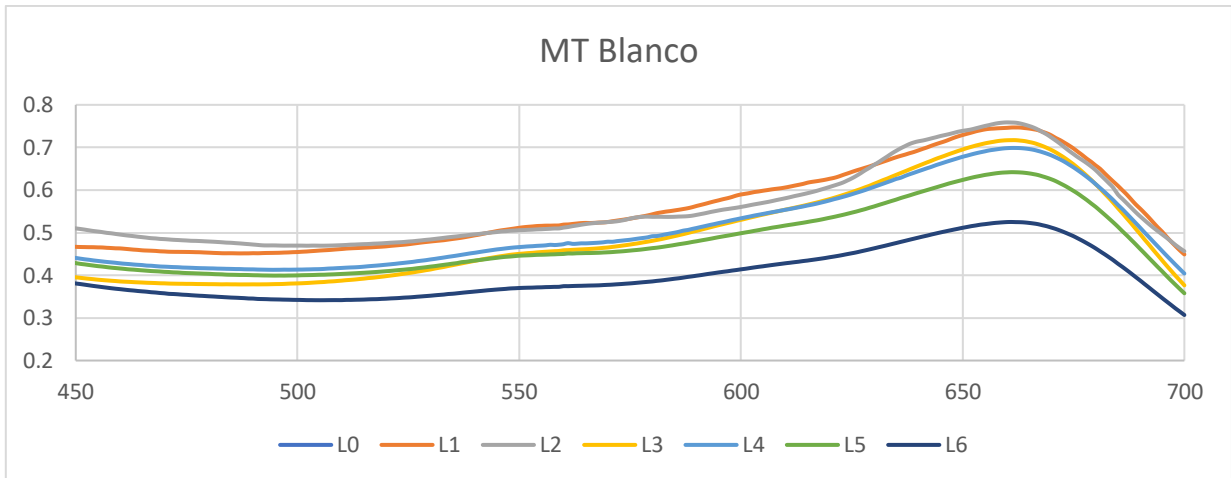
Gráfica 17 Espectro UV-VIS de la muestra textil con SiO₂Clinoptilolita



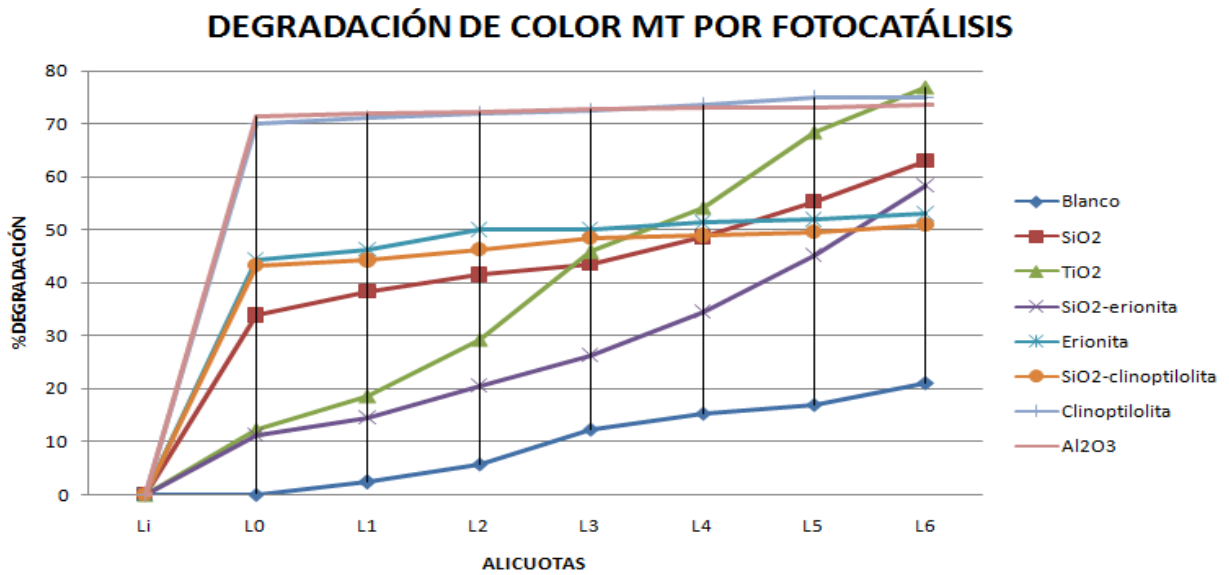
Gráfica 18 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Clinoptilolita



Gráfica 19 Espectro UV-VIS de la muestra textil con Al₂O₃



Gráfica 20 Espectro UV-VIS de la muestra textil (blanco)



Gráfica 21 % Degradación de color de la muestra textil por medio de Fotocatálisis heterogénea

3.6 Crecimiento de los microorganismos para formar los consorcios bacterianos.

Las 11 bacterias utilizadas en esta parte del experimento (Tabla 13) se hicieron crecer en matraces de medio litro del medio líquido Luria Bertani (LB), para obtener la mayor cantidad de biomasa, con la finalidad de formar los consorcios bacterianos.

La biomasa obtenida de los matraces se resuspendió en con caldo LB, para tomar 100 μ L y ser traspasadas a tubos de ensaye que contenían la muestra textil y al colorante azul terasil con sus respectivos catalizadores, de esta manera la propagación de las bacterias formaría los consorcios adecuados para evaluar cuál

sería el más efectivo para degradar los colorantes. Los 5 consorcios se realizaron con 7 bacterias y se describen en la Tabla 14.

Se utilizaron estas bacterias debido a que en proyectos anteriores fueron las que presentaron una degradación eficiente de diferentes colorantes.

Tabla 13 Bacterias utilizadas para realizar los consorcios bacterianos.

K131 <i>Enterobacter</i>	N9 <i>Enterobacter</i>	MC188 <i>Enterobacter</i>	B03 <i>Pseudomona putida</i>	3 <i>Enterobacterhorma echei</i>	9 <i>Enterobacterhorma echei</i>
K120 <i>Serratia</i>	B44 <i>Pseudomona putida</i>	N16 <i>Escherichia coli</i>	1 <i>Pseudomona putida</i>	12 <i>Enterobacterhorma echei</i>	

Tabla 14 Formación de los consorcios bacterianos utilizados en la biodegradación.

Consortio 1	Consortio 2	Consortio 3	Consortio 4	Consortio 5
N9	N16	K131	N9	B03
B44	B03	N9	N16	B44
MC188	K120	MC188	MC188	MC188
1	1	1	1	1
3	3	3	3	3
12	12	12	12	12
9	9	9	9	9

3.7 Pruebas de biodegradación con consorcios bacterianos

A las muestras después de la fotocatalisis se les adicionó cada tipo de consorcio (100µL) que contenían los diferentes consorcios (Tabla 15) y fueron llevadas a incubación por 5 días con la finalidad de que llegaran a un crecimiento máximo para obtener los nutrientes necesarios y degradar de esta forma el colorante.

Después de los 5 días las muestras se llevaron a la centrífuga a 20 mil rpm por 20 minutos para retirar la biomasa y separar el sobrenadante que sería utilizado para analizar la absorbancia por medio de espectroscopía UV-Vis, obteniendo resultados de acuerdo a la concentración de colorante en las muestras analizadas.

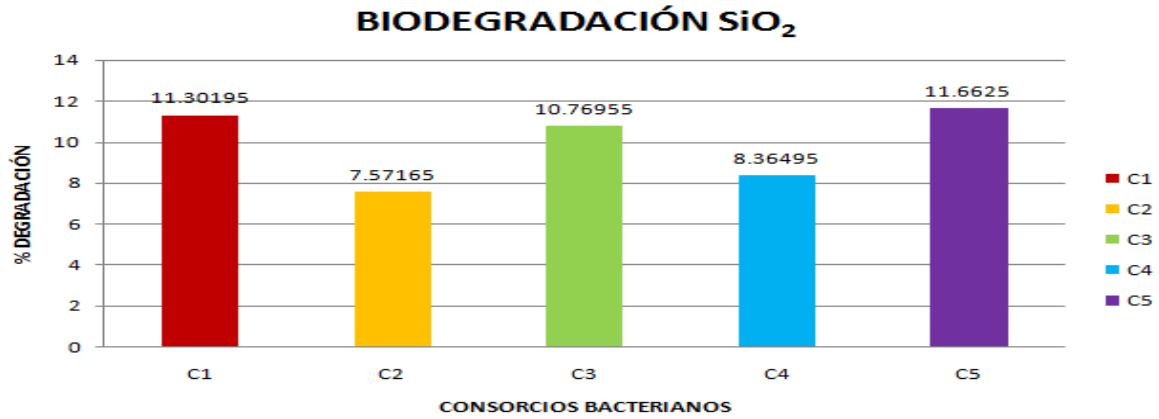
En las Gráficas 22 a la 30 se muestran los cambios de concentración obtenidos durante la espectroscopía UV-Visible para el colorante azul terasil a 50 ppm con los 7 catalizadores, el blanco de colorante azul terasil y un blanco de biodegradación; mientras que en las Gráficas 30 a la 38 se observan las gráficas conforme a la absorbancia de la muestra textil con los 7 catalizadores, su blanco y un blanco de biodegradación.

En la Tabla 15 debe de considerarse el cambiar AT (azul terasil) por MT (muestra textil) para las pruebas de degradación biológica para la muestra textil. Se tienen ahora 9 muestras; SiO₂, TiO₂, SiO₂-Erionita, Erionita, SiO₂-Clinoptilolita, Clinoptilolita, Al₂O₃ y así como su blanco de biodegradación para el colorante azul terasil a 50 ppm sin fotocatalisis y un blanco para la muestra textil sin fotocatalisis, obteniendo un total de 180 muestras a ser analizadas por espectroscopía UV-Visible.

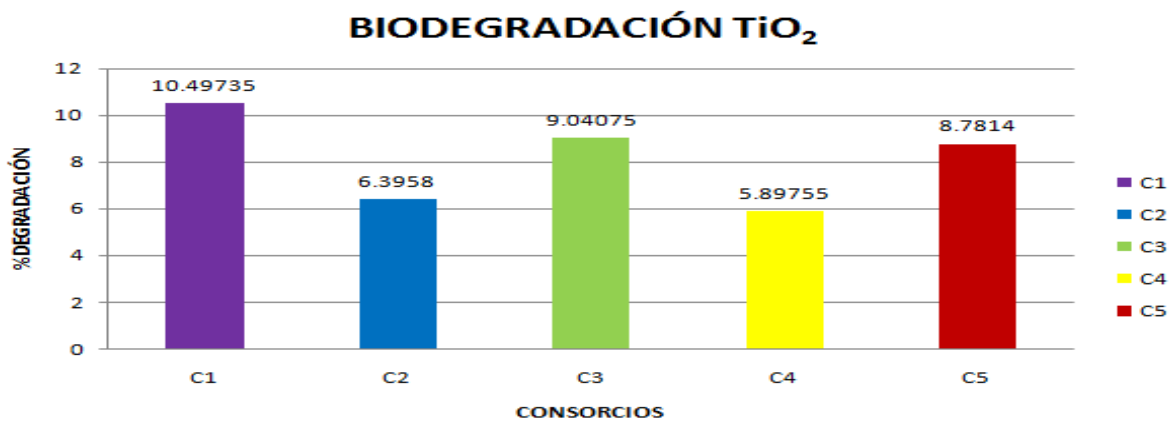
Tabla 15 Nomenclatura de las pruebas de biodegradación.

Catalizador	Nomenclatura	Catalizador	Nomenclatura
SiO ₂	AT-SiO ₂ C1 D1	TiO ₂	AT-TiO ₂ C1 D1
	AT-SiO ₂ C1 D2		AT-TiO ₂ C1 D2
	AT-SiO ₂ C2 D1		AT-TiO ₂ C2 D1
	AT-SiO ₂ C2 D2		AT-TiO ₂ C2 D2
	AT-SiO ₂ C3 D1		AT-TiO ₂ C3 D1
	AT-SiO ₂ C3 D2		AT-TiO ₂ C3 D2
	AT-SiO ₂ C4 D1		AT-TiO ₂ C4 D1
	AT-SiO ₂ C4 D2		AT-TiO ₂ C4 D2
	AT-SiO ₂ C5 D1		AT-TiO ₂ C5 D1
	AT-SiO ₂ C5 D2		AT-TiO ₂ C5 D2
SiO ₂ -Eri	AT-SiO ₂ -Erionita C1 D1	Erionita	AT-Erionita C1 D1
	AT-SiO ₂ -Erionita C1 D2		AT-Erionita C1 D2
	AT-SiO ₂ -Erionita C2 D1		AT-Erionita C2 D1
	AT-SiO ₂ -Erionita C2 D2		AT-Erionita C2 D2
	AT-SiO ₂ -Erionita C3 D1		AT-Erionita C3 D1
	AT-SiO ₂ -Erionita C3 D2		AT-Erionita C3 D2
	AT-SiO ₂ -Erionita C4 D1		AT-Erionita C4 D1
	AT-SiO ₂ -Erionita C4 D2		AT-Erionita C4 D2
	AT-SiO ₂ -Erionita C5 D1		AT-Erionita C5 D1
	AT-SiO ₂ -Erionita C5 D2		AT-Erionita C5 D2
SiO ₂ -Z-Clinoptilolita	AT-SiO ₂ -Clinoptilolita C1 D1	Clinoptilolita	AT- Clinoptilolita C1 D1
	AT-SiO ₂ -Clinoptilolita C1 D2		AT- Clinoptilolita C1 D2
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C2 D1		AT- Clinoptilolita C2 D1
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita		AT- Clinoptilolita C2

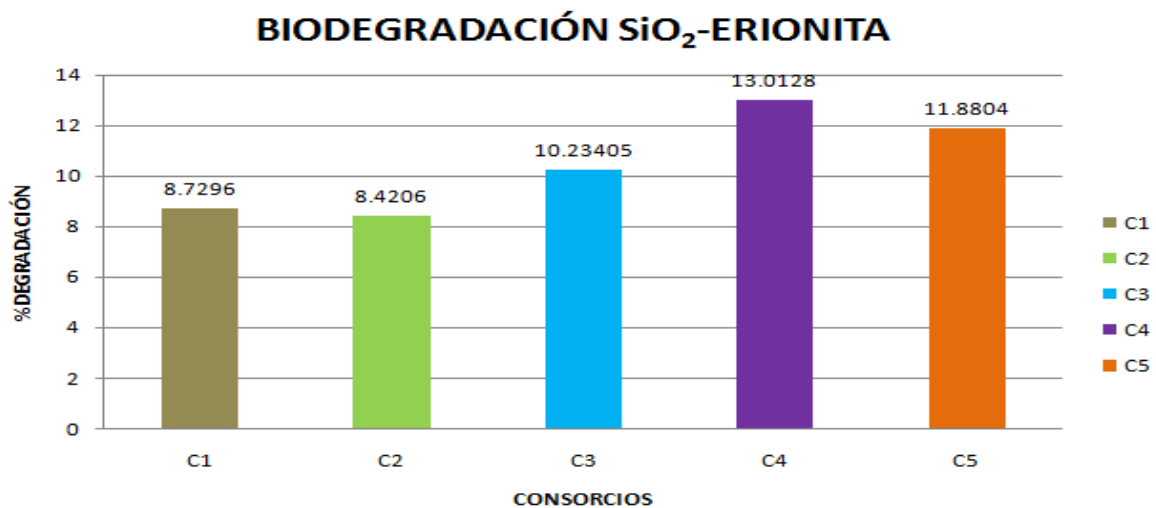
	C2 D2		D2
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C3 D1		AT- Clinoptilolita C3 D1
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C3 D2		AT - Clinoptilolita C3 D2
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C4 D1		AT- Clinoptilolita C4 D1
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C4 D2		AT- Clinoptilolita C4 D2
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C5 D1		AT- Clinoptilolita C5 D1
	AT-SiO ₂ - Clinoptilolita C5 D2		AT- Clinoptilolita C5 D2
AL ₂ O ₃	AT-AL ₂ O ₃ C1 D1	Blanco Biodegradación	AT-Blanco bio C1 D1
	AT-AL ₂ O ₃ C1 D2		AT-Blanco bio C1 D2
	AT-AL ₂ O ₃ C2 D1		AT-Blanco bio C2 D1
	AT-AL ₂ O ₃ C2 D2		AT-Blanco bio C2 D2
	AT-AL ₂ O ₃ C3 D1		AT-Blanco bio C3 D1
	AT-AL ₂ O ₃ C3 D2		AT-Blanco bio C3 D2
	AT-AL ₂ O ₃ C4 D1		AT-Blanco bio C4 D1
	AT-AL ₂ O ₃ C4 D2		AT-Blanco bio C4 D2
	AT-AL ₂ O ₃ C5 D1		AT-Blanco bio C5 D1
	AT-AL ₂ O ₃ C5 D2		AT-Blanco bio C5 D2
Blanco Fotocatálisis	AT-Blanco foto C1 D1		
	AT-Blanco foto C1 D2		
	AT-Blanco foto C2 D1		
	AT-Blanco foto C2 D2		
	AT-Blanco foto C3 D1		
	AT-Blanco foto C3 D2		
	AT-Blanco foto C4 D1		
	AT-Blanco foto C4 D2		
	AT-Blanco foto C5 D1		
	AT-Blanco foto C5 D2		



Gráfica 22 Concentración del colorante AT con SiO₂ después de la biodegradación.

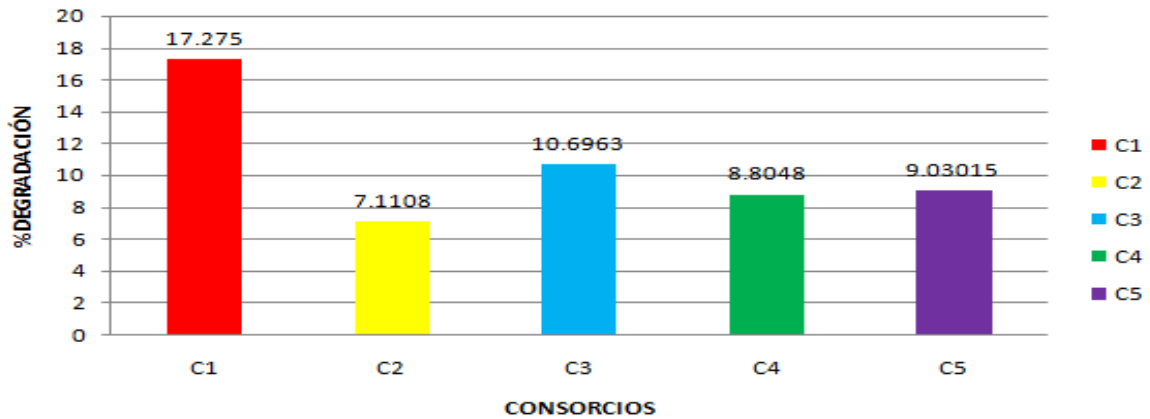


Gráfica 23 Concentración del colorante AT con nTiO₂ después de la biodegradación



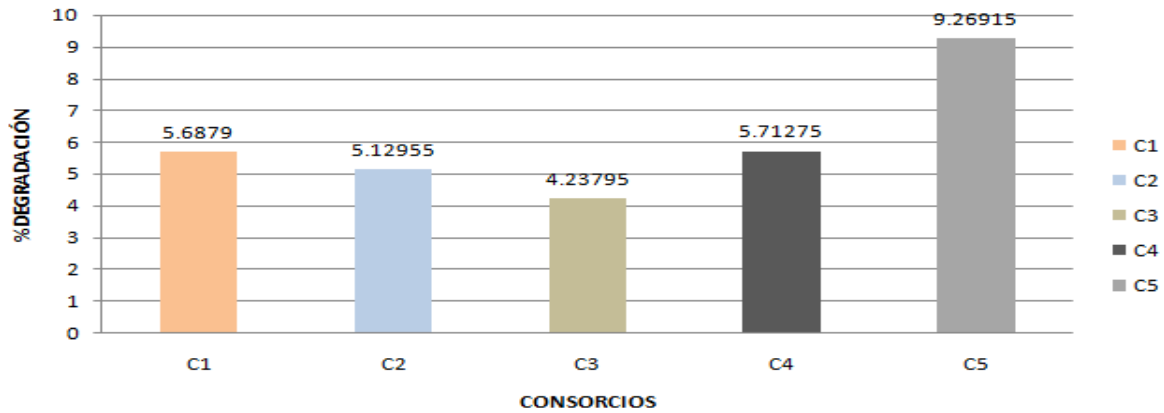
Gráfica 24 Concentración del colorante AT con SiO₂-Erionita después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN ERIONITA



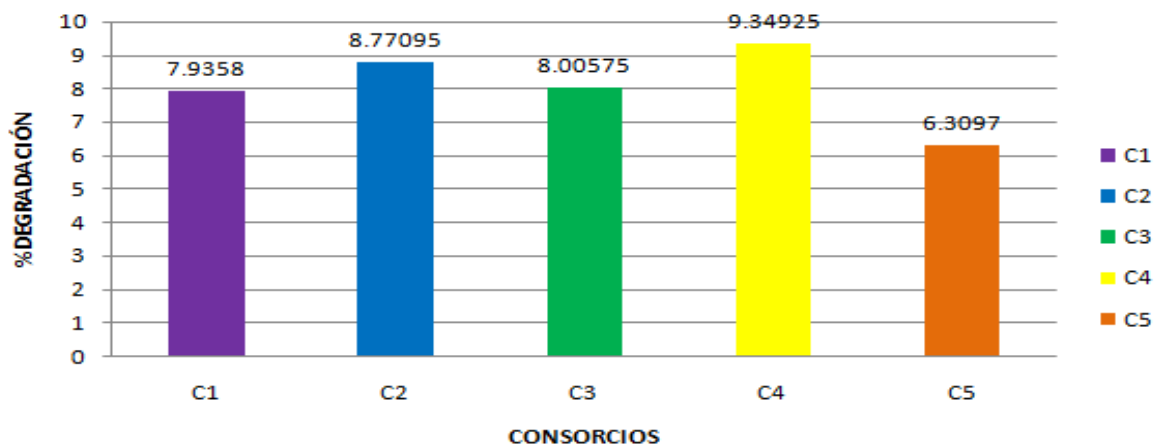
Gráfica 25 Concentración del colorante AT con erionita después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN SiO₂-CLINOPTILOLITA



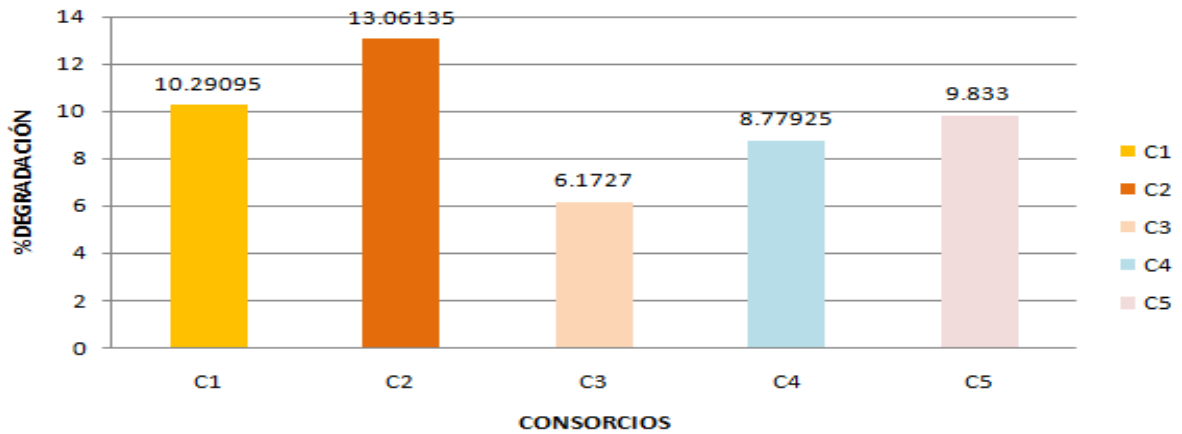
Gráfica 26 Concentración del colorante azul terasil con SiO₂-clinoptilolita después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN CLINOPTILOLITA



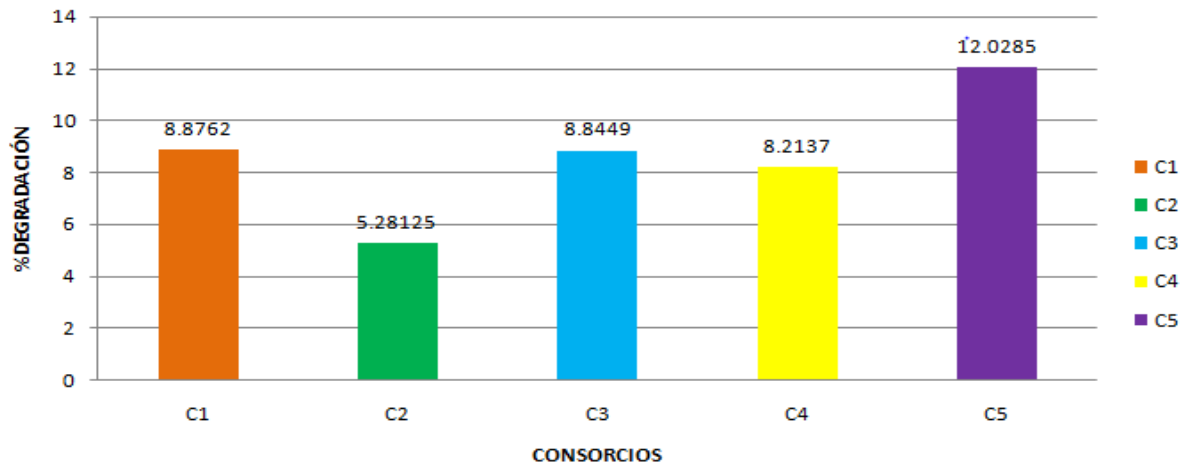
Gráfica 27 Concentración del colorante azul terasil con Clinoptilolita después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN Al_2O_3



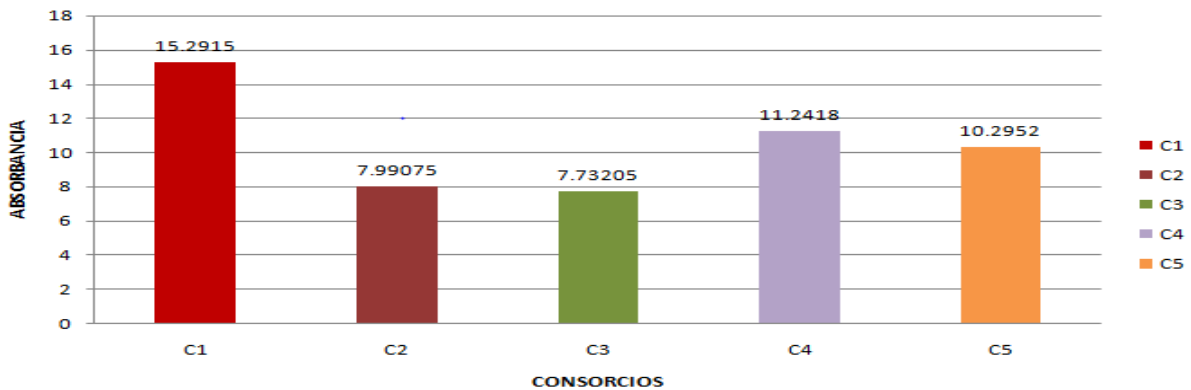
Gráfica 28 Concentración del colorante azul terasil con Al_2O_3 después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN BLANCO FOTOCATALISIS



Gráfica 29 Concentración del blanco de la fotocatalisis del colorante azul terasil de la posterior degradación bacteriana.

BLANCO BIODEGRADACIÓN



Gráfica 30 Concentración del blanco de biodegradación.

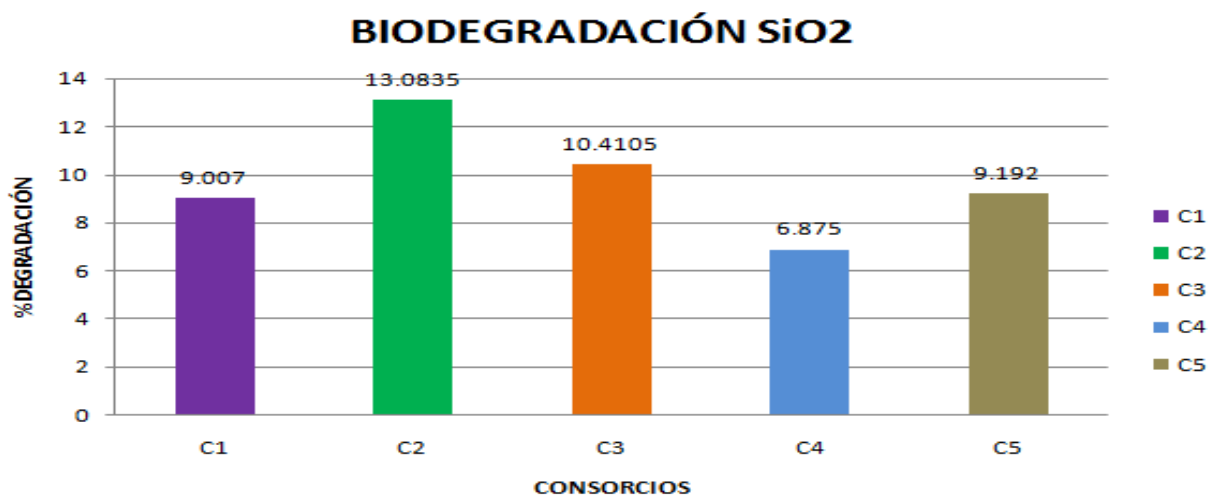
Para obtener los resultados de concentración fue necesario utilizar nuevamente la curva de calibración para el colorante azul terasil y obtener mediante espectroscopía UV-Vis los resultados de concentración después de los 5 días de degradación bacteriana, cabe señalar que la biodegradación fue después de la fotocatalisis.

En las Gráficas 22, 24, 25 y 29 se muestran las gráficas de barras para el colorante azul terasil a 50 ppm con SiO₂, SiO₂-erionita, la erionita y el blanco de fotocatalisis respectivamente al final de la degradación biológica, se puede observar que el consorcio con mayor degradación fue el C2, sin embargo todos los consorcios obtuvieron un porcentaje de color final por debajo del 12%.

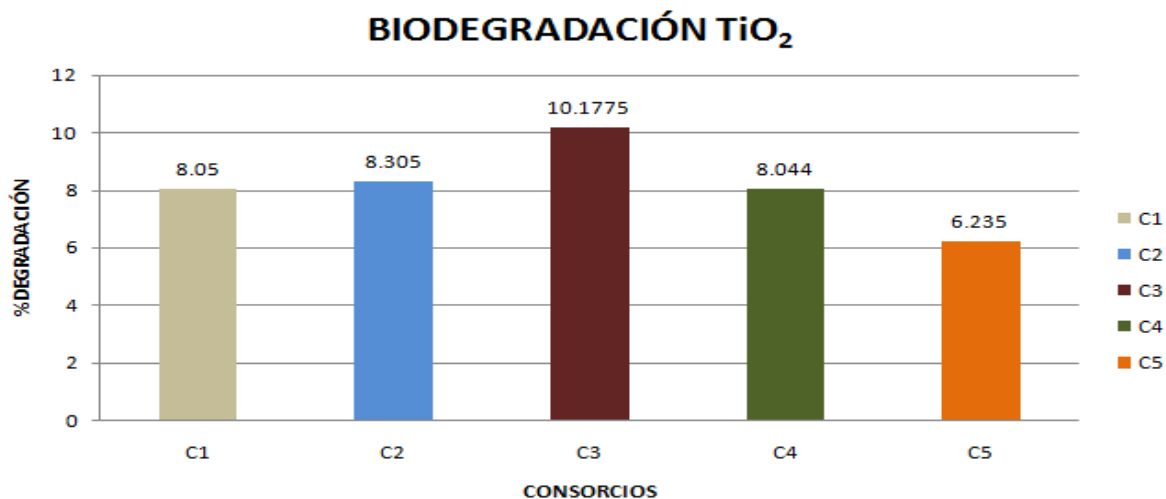
En la Gráfica 23 para el dióxido de titanio el consorcio 4 fue el de mayor degradación, sin embargo todos los consorcios obtuvieron un porcentaje menor al 10% del color.

Para el SiO₂-clinoptilolita, la alúmina y el blanco de biodegradación presentados en las graficas 26, 28 y 30 respectivamente obtuvieron buenos resultados con el consorcio 3 que ayudaron a degradar el colorante a concentraciones muy bajas.

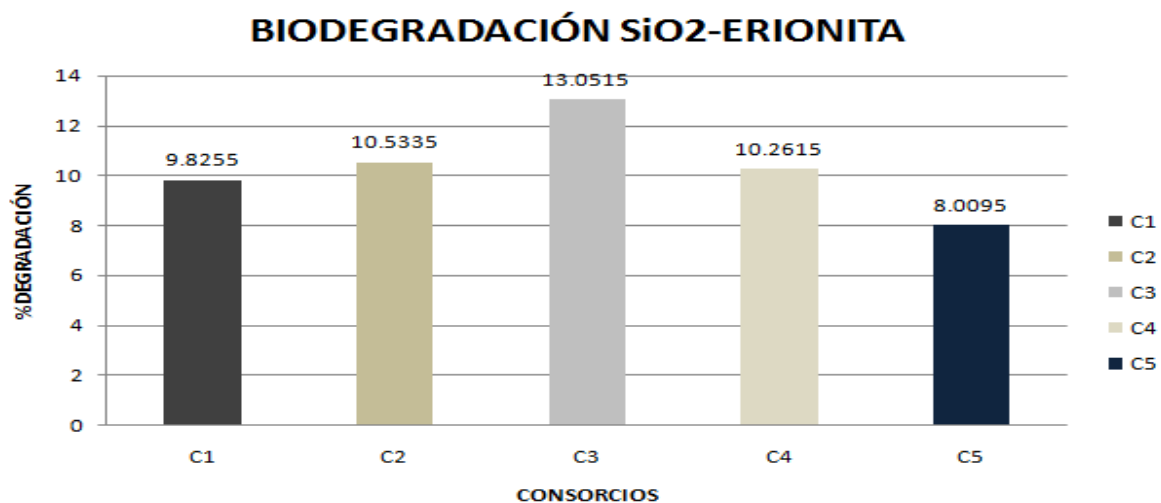
Para la clinoptilolita presentada en la Gráfica 27 el consorcio 5 fue el de mayor degradación, aunque se muestran valores por debajo del 10% de concentración del colorante azul terasil.



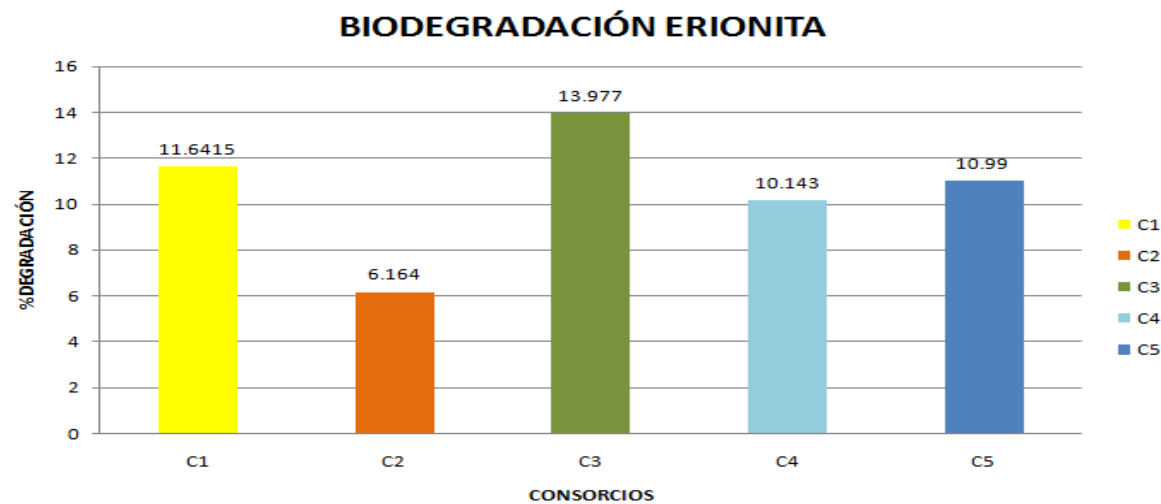
Gráfica 31 Concentración de la muestra textil con SiO₂ después de la biodegradación.



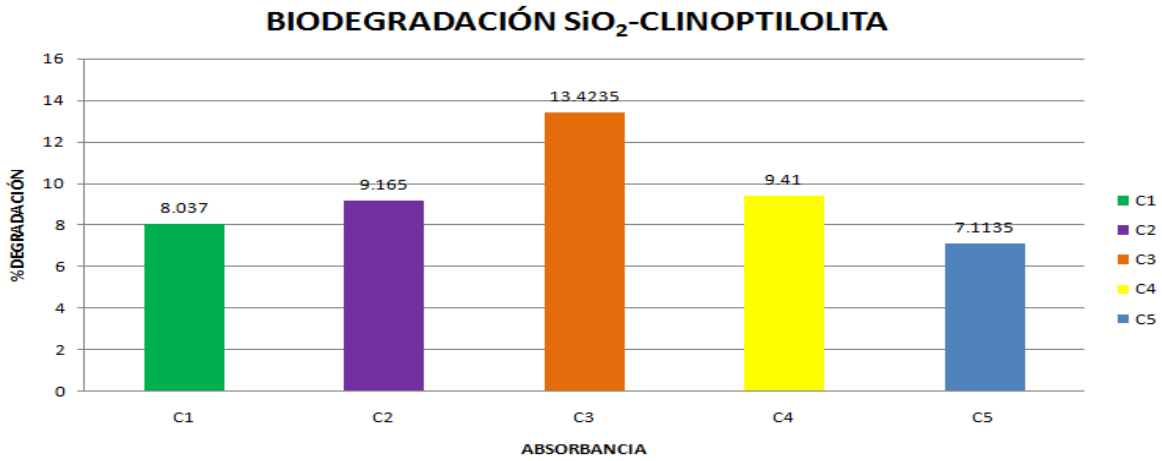
Gráfica 32 Concentración de la muestra textil con TiO₂ después de la biodegradación.



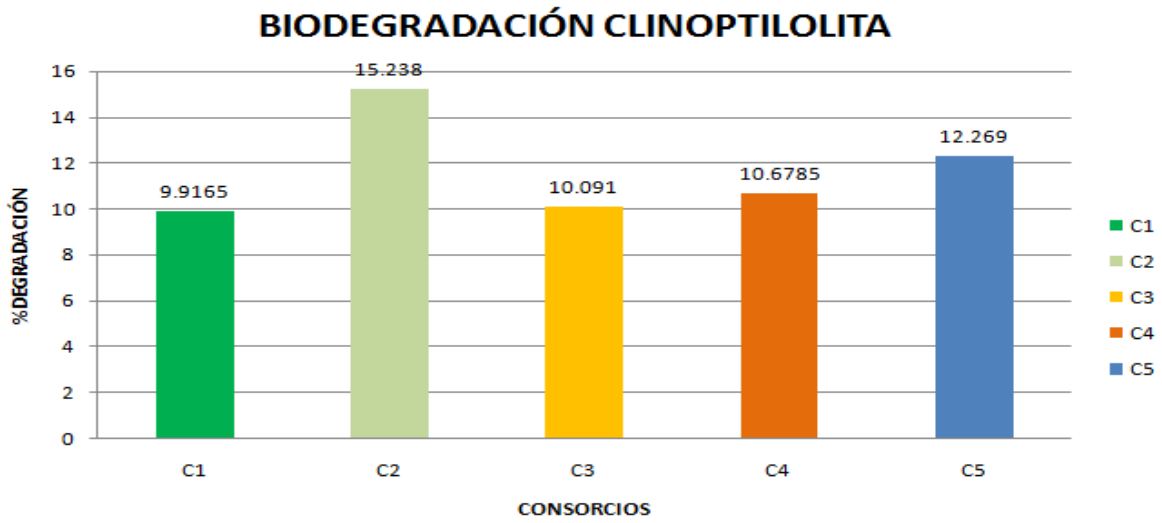
Gráfica 33 Concentración de la muestra textil con SiO₂-erionita después de la biodegradación.



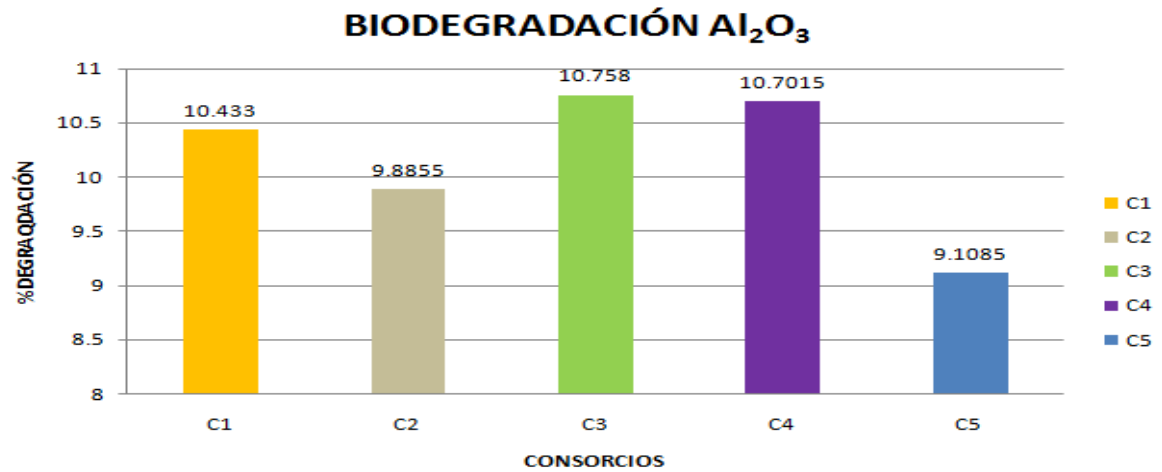
Gráfica 34 Concentración de la muestra textil con erionita después de la biodegradación.



Gráfica 35 Concentración de la muestra textil con SiO₂-clinoptilolita después de la biodegradación.

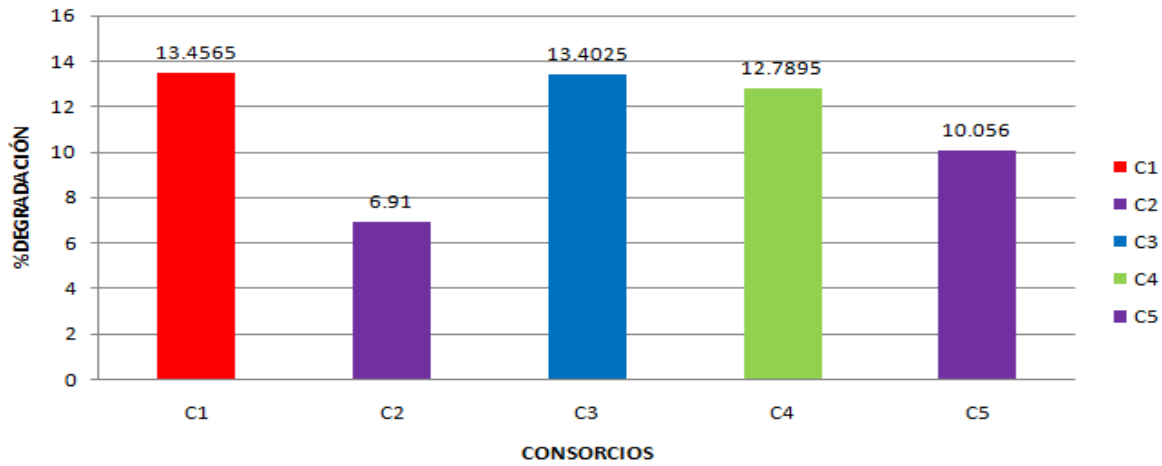


Gráfica 36 Concentración de la muestra textil con clinoptilolita después de la biodegradación.



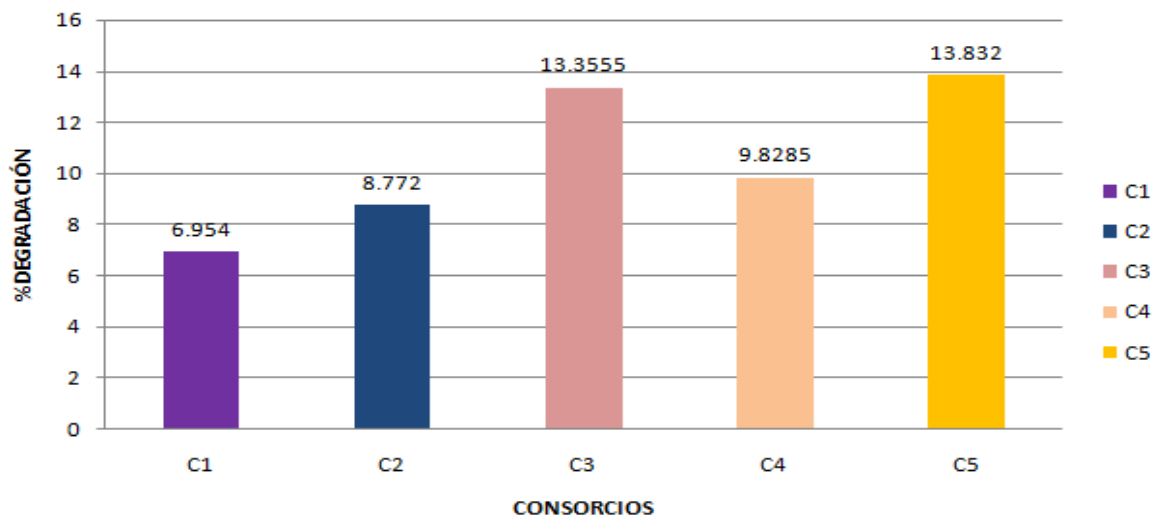
Gráfica 37 Concentración de la muestra textil con Al₂O₃ después de la biodegradación.

BIODEGRADACIÓN BLANCO FOTOCATÁLISIS



Gráfica 38 Concentración del blanco de la fotocatalisis de la muestra textil después de la biodegradación.

BLANCO BIODEGRADACIÓN



Gráfica 39 Concentración de la muestra textil del blanco de biodegradación después de la prueba de degradación microbiana.

En las Gráficas 31 a la 39 se presenta el porcentaje de degradación de la muestra textil con los consorcios bacterianos, al igual que el colorante textil se utilizó el espectrofotómetro UV-VIS para conocer la disminución del color en esta muestra para los 7 catalizadores, un blanco de muestra textil después de la fotocatalisis y un blanco de biodegradación.

En la Gráfica 31 se puede apreciar la muestra textil después de la fotocatalisis con el catalizador SiO_2 donde el consorcio 4 fue el que tuvo un mayor porcentaje de degradación de los colorantes con que se compone la muestra.

La muestra textil con TiO_2 , SiO_2 -erionita, SiO_2 -clinoptilolita y la alúmina después de la fotocatalisis con la degradación bacteriana por los cinco consorcios se pueden apreciar en las Gráficas 32, 33, 35 y 37 observando al consorcio 5 que tuvo la mayor disminución de color lo que demuestra que el consorcio 5 puede degradar altas concentraciones de color con los diferentes consorcios.

Para las zeolitas erionita (Gráfica 34) y clinoptilolita (Gráfica 36) los consorcios 1 y 2 fueron los que obtuvieron el mayor porcentaje de degradación del color de la muestra textil.

Para los blancos de fotocatalisis (Gráfica 38) y de biodegradación los consorcios con mayor degradación del color fueron los consorcios 2 y 1, inclusive se logra observar que la falta de los catalizadores hace que la disminución sea menor.

Conclusiones

El experimento concluyo con resultados capaces de confirmar la hipótesis establecida donde tener una combinación entre una degradación fisicoquímica y otra bacteriana favorece la degradación de los colorantes en aguas residuales textiles. El trabajo de tesis concluye de manera correcta mostrando que el colorante azul terasil puede ser reducido y degradado por medio de la catálisis con luz solar seguido de un proceso de degradación bacteriana hasta obtener un líquido incoloro.

Los catalizadores se sintetizaron y tuvieron una gran capacidad catalítica durante la etapa de fotodegradación para reducir el color, se obtuvieron polvos finos y capaces de reducir el colorante azul terasil, durante este experimento se prepararon catalizadores de aluminio y silicio, así como sus combinaciones con las zeolitas naturales mediante el método sol-gel lo que demuestra que este método tiene una gran capacidad para formar semiconductores de alto nivel catalítico.

La composición elemental química realizada para los catalizadores utilizados demuestra que los catalizadores no tuvieron impurezas y que el método sol-gel para la síntesis de los catalizadores es adecuado para lograr materiales con buen desempeño o capacidad fotocatalítica.

Para las pruebas de fotocatalisis se tuvieron pequeños problemas debido al clima en el que se realizaron las pruebas ya que hubo nubosidad y lluvias que provocaron el tener que posponer el experimento hasta que el clima fue apto para la fotodegradación, lo que nos dice que el clima es un factor determinante para desarrollar este tipo de procesos en cuanto al uso de la catálisis con luz solar, más sin embargo cuando se dio el cambio de clima se pudo lograr mantener el colector solar con la mayor cantidad de luz ultravioleta obtenida de la radiación solar, como se puede observar en los resultados el TiO_2 y las zeolitas Clinoptilolita y Erionita obtuvieron una alta capacidad para catalizar por medio de luz solar y reduciendo el colorante azul terasil después de las 6 horas de fotocatalisis, sin embargo la reducción del color en el blanco fue muy rápida puesto que la reducción de color se da sin catalizador y con luz solar y esto puede deberse a una evaporación de la muestra.

Durante la fotocatalisis de la muestra textil los 7 catalizadores obtuvieron altos rendimientos en la disminuci3n del color como pueden observarse en las 3ltimas horas de la fotocatalisis como en el TiO₂, el SiO₂ as3 como sus combinaciones con zeolitas en que se notan l3quidos con un color menos oscuro que el de la muestra original.

Durante la evaluaci3n de las al3cuotas por medio de espectroscop3a UV-Vis se observ3 que para el colorante azul terasil con TiO₂ y las dos zeolitas fueron las que mejor redujeron la coloraci3n de la muestra con el colorante azul terasil, en cuanto se habla de la determinaci3n de la concentraci3n mediante la curva de calibraci3n se observan cambios muy grandes en reducci3n de la concentraci3n, esto debido a que el colorante azul terasil fue degradado con fotocatalisis a lo mucho en un 30%; mientras que para la muestra textil todos los catalizadores obtuvieron buenos resultados en cuanto a reducci3n del color oscuro que presentaba la muestra textil y al haberse sido evaluados por espectroscop3a en la cual se observa que la muestra Li o absorbancia del colorante azul terasil sin ninguna alteraci3n tiene un valor muy alto de absorbancia, muchas muestras se observan por debajo de este valor solamente despu3s de las 24 h de oscuridad con los catalizadores correspondientes y que posteriormente en la cat3lisis con luz solar hay cambios de una manera dr3stica.

Los resultados obtenidos de la biodegradaci3n, cabe mencionar que esta prueba se realiz3 con las muestras finales de la fotocatalisis y que con ayuda de la degradaci3n bacteriana se logr3 obtener una reducci3n del color casi total en todas las muestras, sobre todo se debe mencionar que los consorcios utilizados fueron capaces de utilizar como nutrientes la materia org3nica presente en las aguas coloreadas, conociendo as3 la capacidad de estas bacterias en degradar el colorante en las muestras, obteniendo como el mejor resultado de degradaci3n del color azul terasil la combinaci3n del consorcio 3 y la zeolita erionita; y la combinaci3n del consorcio 2 con la erionita fue la de mayor disminuci3n del color en la muestra textil.

Como conclusión se puede decir que el uso de la fotocatalisis asistida con degradación bacteriana puede aumentar el porcentaje de degradación de las muestras casi en su totalidad y que puede ser eficaz para la degradación de colorantes en el tratamiento de aguas residuales que contengan colorantes, puesto que estos catalizadores obtuvieron una degradación alta en la muestra textil. Además de que el experimento termino de manera satisfactoria, cumpliendo los objetivos establecidos y demostrando que la hipótesis fue correcta.

Bibliografía

Angeles Llanos, M. M. (2018). Biorremediación de efluentes orgánicos de la industria alimentaria, mediante un sistema mixto integrado por un biorreactor UASB empacado con bacterias anaerobias y un biorreactor AIRLIFT empacado con Hongos Filamentosos.

Barceló, D., & López, M. J. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas, Sevilla.*

Blanco, J. (2005). El reactor solar fotocatalítico: estado del arte. *Solar safe water project book.*

Buscio, V., Marín, M. J., Crespi, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2015). Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Journal, 265*, 122-128.

Calle, J. R., Valencia, A. E. H., & Arias, A. N. A. (2015). Degradación fotocatalítica de los colorantes rojo reactivo 120 y azul reactivo 4 hidrolizados usando tio₂ dopado con hierro o nitrógeno. *Revista Politécnica, 11(20)*, 9-19.

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Waterresearch, 44(10)*, 2997-3027.

Clemente, J. P. (2008). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2014). Numeragua México 2014.

CONAGUA, S. (2012). Atlas del agua en México 2014.

Corona, O. L., Hernández, M. A., Hernández, F., Rojas, F., Portillo, R., Lara, V., & Carlos, F. (2009). Propiedades de adsorción en zeolitas con anillos de 8 miembros I. Microporosidad y superficie externa. *Revista Materia, 14(3)*, 918-931.

Cortazar-Martínez, A., González-Ramírez, C. A., Coronel-Olivares, C., Escalante-Lozada, J. A., Castro-Rosas, J., & Villagómez-Ibarra, J. R. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y ciencia*, 28(2), 187-199.

Corzo Lucioni, A., & Vega Baudrit, J. (2012). Estudio cinético de la degradación fotocatalítica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13, 60-68.

Curi, A., Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la descontaminación de efluentes Mineros. *Información tecnológica*, 17(6), 111-118.

DE LA FEDERACIÓN, Diario Oficial. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Enero, 1997, vol. 6.

Deza Martí, E., Osorio Anaya, A., & Manrique Fajardo, J. J. (2017). Evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron Navy H-2G empleando nanopartículas industriales de TiO₂. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(2), 160-173.

Garcés Giraldo, L. F., Franco, M., Alejandro, E., & Santamaría Arango, J. J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Garcés Giraldo, L. F., Hernández Ángel, M. L., Peñuela Mesa, G. A., Rodríguez Restrepo, A., & Salazar Palacio, J. A. (2005). Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis. *Revista Lasallista de investigación*, 2(1).

Garcés Giraldo, L. F., Franco, M., Alejandro, E., & Peñuela Mesa, G. A. (2005). Cinética de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto por medio de la fotocatalisis con luz solar.

Garzón Jiménez, R. C. (2009). *Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequilana Webber var azul* (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias).

González Hernández, J., Pérez Robles, J. F., Ruiz, F., & Martínez, J. R. (2000). Vidrios SiO₂ nanocompuestos preparados por sol-gel: revisión. *Superficies y vacío*, (11).

Gómez, S., Miguel, A. D., & Macorra García, J. C. D. L. (1997). Estudio de la microfiltración: modificación a un método. *Avances en Odontología*, 13(4), 265-271.

Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.

Kirk, R. E., Othmer, D. F., Grayson, M., & Eckroth, D. (1985). *Kirk-Othmer Concise encyclopedia of chemical technology*.--. Wiley.

Lapeña, M. R., & Rigola, M. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales* (Vol. 27). Marcombo.

López-Vásquez, A., Almanza, O., Acosta, M. F., & Suárez-Escobar, A. (2016). Degradación Fotocatalítica de Contaminantes Orgánicos Presentes en Agua Residual de la Industria Litográfica mediante Oxido de Bismuto (NI)/Oxido de Titanio (Bi₂O₃/TiO₂). *Información tecnológica*, 27(1), 147-158.

Martín Rodríguez, M. (1987). La industria azucarera española, 1914-1936.

Martínez, A. C., Olivares, C. C., Lozada, A. E., & Ramírez, C. G. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín de la Escuela Preparatoria No. 4*, 2(3).

Masuda, R., Takahashi, W., & Ishii, M. (1990). Particlesizedistribution of sphericalsilica gel producedby sol-gel method. *Journal of Non-crystalline solids*, 121(1-3), 389-393.

McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1981). *Operaciones básicas de ingeniería química* (Vol. 1). Reverté.

Montes-Luna, A. D. J., Fuentes-López, N. C., Perera-Mercado, Y. A., Pérez-Camacho, O., Castruita-de León, G., García-Rodríguez, S. P., & García-Zamora, M. (2015). Caracterización de Clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. *Superficies y vacío*, 28(1), 5-11.

Paez, C., & Taborda, G. (2006). La fotocatalisis: aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes. *Revista Universidad de Caldas*, 7, 71-88.

Patiño, F. V. G. (2016). *Diseño y evaluación de un reactor para la producción de hidrogeno por fotocatalisis heterogenea a partir de soluciones acuosas alcohólicas* (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial).

Peralta-Perez, M. R., Martinez-Trujillo, M. A., Nevárez-Moorillón, G. V., Pérez-Bedolla, R., & García-Rivero, M. (2011). Immobilization of *Aspergillus niger* sp. in sol gel and its potential for production of xylanases. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 57(1), 6-11.

Pérez Zurita, M. M. (2014). *Estandarización de procesos de la empresa textiles técnicos* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Carrera de Ingeniería Industrial en Procesos de Automatización).

Piña, S. (2007). *Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio* (Doctoral dissertation, Tesis para obtener el grado de Ingeniería Ambiental.[En línea]. México, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en: [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1732/pi% C3% B1amon dragon.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1732/pi%C3%B1amon%20dragon.pdf)).

Ramalho, R. S. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.

Ramos, G. C. D. (2014). Ciudad, agua y cambio climático: una aproximación desde el metabolismo urbano. *Medio ambiente y urbanización*, 80(1), 95-123.

Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49.

Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, 1(1), 8-15.

Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *JA Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*, 17-23.

Saien, J., Ojaghloo, Z., Soleymani, A. R., & Rasoulifard, M. H. (2011). Homogeneous and heterogeneous AOPs for rapid degradation of Triton X-100 in aqueous media via UV light, nanotitania hydrogen peroxide and potassium persulfate. *Chemical Engineering Journal*, 167(1), 172-182.

Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*.

Sanz, C. F., & de Tejada, F. J. P. (1994). Influencia del contenido de dióxido de titanio en las propiedades de las pinturas alcidicas utilizadas en marcas viales. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (73), 98-108.

Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(1), 138-157.

Saritha, P., Aparna, C., Himabindu, V., & Anjaneyulu, Y. (2007). Comparison of various advanced oxidation processes for the degradation of 4-chloro-2 nitrophenol. *Journal of hazardous materials*, 149(3), 609-614.

SEMARNAT, C. (2013). Programa Nacional Hídrico 2014-2018.

Suslick, K. S. (1998). Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. *J. Wiley & Sons: New York*, 26, 517.

Tapia, I. M., García, M. Á. O., Belmonte, S. L. V., Tecuatl, N. M., & Hernández, J. C. M. monitoreo de la cinética de la biodegradación de colorantes textiles en un biorreactor mediante espectrofotometría UV/VIS e IR.

Tobón Carvajal, Y. A., & Peñaloza, M. A. Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotodegradación con métodos comparativos entre catálisis heterogénea (TiO₂) y homogénea (fotofentón).

Trinidad Cruz, I. (2017). *Optimización de los parámetros que influyen en la degradación química de rojo congo utilizando fotocatalisis heterogénea* (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería-Ingeniería Ambiental-UNICACH).

Umar, M., & Aziz, H. A. (2013). Photocatalytic degradation of organic pollutants in water. In *Organic Pollutants-Monitoring, Risk and Treatment*. IntechOpen.

Vázquez, J. C., Rodríguez, S. M., & Alba, A. R. F. (2003). *Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar*. CIEMAT.

Vidal, G., Nieto, J., Márquez, F., Mansilla, H., & Bornhardt, C. (2000). Combinación de procesos biológicos y oxidación avanzada para el tratamiento de una corriente de proceso de la industria de curtiembre.

Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales: modelado y simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 217-233.

Vimonses, V., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). An adsorption–photocatalysis hybrid process using multi-functional-nanoporous materials for wastewater reclamation. *Waterresearch*, 44(18), 5385-5397.