



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FÉ”

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA



**TITANATO DE CALCIO (CaTiO_3) COMO CATALIZADOR EN LA
DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

AGUIRRE AQUINO LORENZO ENRIQUE

DIRECTOR:

DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA

CODIRECTOR:

DR. RAFAEL TORRES RICÁRDEZ

Cunduacán, Tabasco, Septiembre 2024

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 23 del mes Septiembre del año 2024, los que suscriben Lorenzo Enrique Aguirre Aquino alumno (a) del programa de Ingeniería Química con número 182d22054 respectivamente, adscritos a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(es) de la Tesis presentada para la obtención del (título, diploma o grado según sea el caso) de Ingeniero Química y titulada **"Titanato De Calcio (CaTiO₃) Como Catalizador En La Degradación Fotocatalítica De Azul De Metileno"** dirigida por la Dra. María Fernanda García Mendoza y el Dr Rafael Torres Ricárdez.

DECLARAMOS QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Cunduacán, Tabasco a 23 de Septiembre de 2024.



Lorenzo Enrique Aguirre Aquino



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



**2024
Felipe Carrillo
PUERTO**
MÉXICO

DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL
FECHA: 23 DE SEPTIEMBRE DE 2024
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/323/ID323/2024

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

"Titanato de calcio (CaTiO₃) como catalizador en la degradación fotocatalítica de azul de metileno."

Desarrollado por el C. LORENZO ENRIQUE AGUIRRE AQUINO de la Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

DRA. EBELIA DEL ANGEL MERÁZ
Revisor

DRA. MAYRA AGUSTINA PANTOJA CASTRO
Revisor

DR. JUAN GABRIEL ALVAREZ RAMÍREZ
Revisor

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
Revisor

DRA. MARCELA DEL CARMEN ARELLANO CORTAZA
Revisor

DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA
Director de Trabajo Recepcional

DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ
Co-Director de Trabajo Recepcional



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2024
Felipe Carrillo
PUERTO

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0893/2024
FECHA: 25 de septiembre de 2024
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva

C. LORENZO ENRIQUE AGUIRRE AQUINO
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por la DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA y el DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ, titulado:

"Titanato de calcio (CaTiO_3) como catalizador en la degradación fotocatalítica de azul de metileno."

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despidió deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-323
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UN ALFARO DE CALIDAD PARA LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre de 2024

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES (RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada titulada "Titanato De Calcio (CaTiO_3) Como Catalizador En La Degradación Fotocatalítica De Azul De Metileno". Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABOLADORES



Lorenzo Enrique Aguirre Aquino



Dra. María Fernanda García Mendoza



Dr. Rafael Torres Ricárdez.

Dedicatoria

Doy gracias a mi madre Lorensa Aquino Alejandro a mi padre Baltazar Aguirre Pérez y a Dios por haberme ayudado en este largo camino que decidí tomar en el año 2018, también agradecer mis hermanos y hermanas por darme ánimos y guiarme cuando me equivocaba,

A mis amigos de la carrera, Katy, Nacho, Nes, Prax, Alan, los emmas (Chapuz y Vázquez), Jorge, Mario, Marcos (Burboa), Efraín, Erick, Juan, Pancho, German y Dani, con los que pase momentos felices y amargos momentos (sobre todo en las semanas de exámenes), les agradezco de corazón haberme soportado todos estos años.

A mis amigos y compañeros del laboratorio Mario, Vanesa, Dani, Erick, Cantarell, Franklin, Remedios, Aysa, Vicente, Romario, Yari, Aracely, Cristian, Arath, Ángel, Heber, las Paolas (nunca supe cuál era cuál), con quienes inicié el servicio y prácticas, quienes me apoyaban en los experimentos, especialmente a Efraín por haberme ayudado en varias ocasiones hacer los experimentos (lo hice todo yo nomás que se enfada si no lo pongo), a Chan por el apoyo que me dio (solo molestaba el wey este) y Jauregui por los ratos que me acompañaba haciendo la tesis (solo criticaba este wey).

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Dios por guiarme en esta larga travesía y no haberme abandonado.

Quiero agradecer a la institución por haberme dado la oportunidad de ser un estudiante, poder ser un ingeniero y cumplir uno de mis sueños.

Al Dr. Rafael por haberme aceptado en el servicio social y al Dr. German por darme la oportunidad de dar las prácticas con él, al Dr. Brayán por invitarnos el pan y el café y sobre todo a la Dra. María Fernanda quien fue la que me ayudo y guio en toda la travesía de la elaboración de la tesis sin su apoyo esto no hubiera sido posible le agradezco todo lo que me enseñó y por tener la paciencia suficiente conmigo a la hora de la redacción de la tesis.

Al comité revisor integrado por la Dra. Ebelia del Ángel Meráz, Dra. Marcela del Carmen Arellano Cortaza, Dr. Juan Gabriel Álvarez Ramírez, Dr. Ildelfonso Zamudio Torres y la Dra. Mayra Agustina Pantoja Castro, gracias por sus observaciones con las que pude avanzar en la creación de la tesis.

Índice

Capítulo 1: Introducción	3
1.2. Justificación	4
1.3. Preguntas de investigación	5
1.4. Hipótesis	5
1.5. Objetivos.	6
1.5.1. Objetivo General.	6
1.5.2. Objetivos Específicos.	6
Capítulo 2. Marco Teórico.	6
2.1. Contaminantes De Efluentes.	6
2.1.1. Azul De Metileno.	8
2.2. Fotocatálisis.	10
2.2.1. Fotocatálisis Homogénea.	13
2.2.2. Fotocatálisis Heterogénea.	14
2.3. Método Sol-Gel	14
2.4. Perovskitas.	18
2.4.1. Titanato De Calcio (CaTiO ₃).	21
2.5. Rayos XV	23
2.6. UV-Vis	23
Capítulo 3: Desarrollo Experimental.	25

3.1. Síntesis De Perovskita (CaTiO ₃). _____	25
3.2. Caracterización De Polvos (CaTiO ₃). _____	25
3.2.1. Caracterización Estructural (DRX). _____	25
3.2.2. Caracterización Óptica (UV-Vis). _____	25
3.3. Experimentos Fotocatalíticos. _____	26
3.3.1. Fotocatálisis Empleando CaTiO ₃ . _____	26
Capítulo 4: Resultados Y Discusión. _____	26
4.1. Técnicas De Caracterización De Los Polvos De CaTiO ₃ _____	26
4.1.1. Difracción De Rayos X De Los Polvos De CaTiO ₃ . _____	26
4.1.2. Espectrofotometría UV-Vis De Los Polvos De CaTiO ₃ . _____	28
4.1.3. Morfología De Los Polvos De CaTiO ₃ . _____	31
4.2. Determinación De Degradación De Azul De Metileno. _____	32
4.2.1. Actividad Fotocatalítica. _____	32
4.2.2. Constante De Reacción De La Degradación De Azul De Metileno. _____	33
Capítulo 5: Conclusiones. _____	35
5.1. Recomendaciones y perspectivas _____	35
Bibliografía. _____	37
Anexos _____	44

Índice de figuras

Capítulo 2. Marco Teórico.	6
Figura 1: Estructura Química del azul de metileno (19).	9
Figura 2: Activación mediante proceso foto-redox (22).	12
Figura 3: Esquema general del proceso sol-gel y sus aplicaciones (33).	17
Figura 4: Estructura tipo perovskita (36).	19
Figura 5: Espectro electromagnético (38).	24
Capítulo 4: Resultados Y Discusión.	26
Figura 6: Difractograma de CaTiO_3 indicando los planos cristalinos.	28
Figura 7: Espectro de reflectancia difusa de CaTiO_3 .	29
Figura 8: Morfología de polvos de CaTiO_3 , con magnificación de 8a) 500X, 8b) 2000X, 8c) 3000X.	31
Figura 9: Absorbancia y tiempo de degradación de azul de metileno utilizando CaTiO_3 como catalizador.	33
Figura 10: Actividad fotocatalítica de polvos de CaTiO_3 .	34

Índice de ecuaciones

Ec. 1	18
-------	----

Resumen

En este estudio, se investigó la degradación del colorante azul de metileno, ampliamente utilizado en la industria textil como tinte, así como en productos químicos, detergentes y alimentos, mediante fotocatalisis heterogénea. El proceso de descomposición del colorante se llevó a cabo utilizando una fuente de luz ultravioleta en una cámara oscura, empleando titanato de calcio (CaTiO_3) como catalizador. La concentración del colorante en la solución fue de 0.0267 mM.

La síntesis del catalizador tipo perovskita (CaTiO_3) se realizó mediante el método sol-gel, seleccionado por su capacidad de mejorar las propiedades ópticas del material en comparación con otros métodos de síntesis. Se optimizó el proceso al incrementar la temperatura de evaporación del gel, lo que permitió reducir el tiempo de obtención del polvo. La caracterización de la muestra obtenida se llevó a cabo mediante difracción de rayos X, utilizando un equipo D8 ADVANCE BRUKER.

Los resultados de las muestras recolectadas durante el proceso de degradación fueron analizados mediante espectroscopía UV-Vis, empleando un espectrofotómetro Agilent modelo 8453. Los datos obtenidos se compararon con estudios previos, evidenciando la efectividad del proceso bajo las condiciones experimentales descritas.

Abstract

In this study, the degradation of methylene blue dye, widely used in the textile industry as a dye, as well as in chemicals, detergents, and food products, was investigated through heterogeneous photocatalysis. The dye decomposition process was carried out using an ultraviolet light source in a dark chamber, employing calcium titanate (CaTiO_3) as a catalyst. The concentration of the dye in the solution was 0.0267 mM.

The synthesis of the perovskite-type catalyst (CaTiO_3) was performed using the sol-gel method, selected for its ability to enhance the optical properties of the material compared to other synthesis methods. The process was optimized by increasing the gel evaporation

temperature, which reduced the time required to obtain the powder. The characterization of the obtained sample was conducted through X-ray diffraction, using a D8 ADVANCE BRUKER system.

The results of the samples collected during the degradation process were analyzed using UV-Vis spectroscopy, with an Agilent 8453 spectrophotometer. The obtained data were compared with previous studies, demonstrating the effectiveness of the process under the described experimental conditions.

Key Words: Photocatalysis, perovskite, calcium titanate, X-Ray diffraction, UV-Vis.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 1: Introducción

En la actualidad, la contaminación de cuerpos de agua es un problema de carácter mundial. Es un tema de debate académico, social y político debido a la importancia del agua, es uno de los recursos de vital importancia para el desarrollo del ser humano. Sin embargo, pese a ser un recurso bastantepreciado no se ha evitado el uso inadecuado de esta (1).

En algunas zonas de México, hay diversas industrias que usan colorantes de diferentes tipos para la manufactura de sus productos, estas industrias vierten contaminantes como el azul de metileno; cabe mencionar que alrededor de estos ríos hay población humana, que utilizan agua de estos efluentes para actividades agrícolas y de consumo, lo que resulta peligroso. Por este motivo existen diferentes métodos para eliminar estos contaminantes tanto biológicos, químicos o fotocatalíticos, aunque algunos de estos métodos no son rentables económicamente a la hora de tratar los residuos generados (2).

La norma oficial mexicana NOM-065-ECOL-1994, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las industrias de pigmentos y colorantes, específicamente el azul de metileno al ser considerado un contaminante bastante peligroso para la salud se tiene que fijar condiciones adicionales para su eliminación, debido a que este puede reaccionar con algunos elementos tóxicos o sustancias activas al azul de metileno lo que puede desencadenar en una contaminación mayor; es por eso que pese con el límite permitido es necesario tener en cuenta que el cuerpo de agua donde se vierta dicho desecho no contenga químicos que puedan reaccionar con el azul de metileno (3).

Uno de los métodos más investigados en la actualidad para eliminar colorantes de aguas residuales es la fotocatalisis, este es un proceso que consiste en irradiar la superficie de un catalizador con rayos UV, con el objetivo de crear un hueco en la banda de valencia y dejar un espacio para sustituir. Este hueco que se genera en la banda de valencia es el encargado de oxidar o reducir, respectivamente, en el lugar donde se lleva a cabo la reacción, este método es ampliamente utilizado principalmente en remediaciones

ambientales, generación de energías renovables, síntesis de compuestos orgánicos entre otras (4, 5)

Este trabajo tiene como finalidad la degradación del colorante azul de metileno, mediante la fotocatalisis, se utilizará el titanato de calcio (CaTiO_3) que se obtendrá mediante el método sol-gel, uno de los métodos químicos más viables económica y ambientalmente, con modificaciones en la forma tradicional de evaporación del solvente empleado para disminuir los tiempos de síntesis y finalmente realizar los experimentos fotocatalíticos.

El titanato de calcio (CaTiO_3) pertenece a la familia de las perovskitas, este tipo de materiales fueron descubiertos en Rusia por Gustav Rose en el año 1839, este material tiene propiedades bastante interesantes y sus aplicaciones tecnológicas, en los últimos años se han mejorado sus propiedades estructurales y físicas (6).

1.2. Justificación

La importancia de conservar nuestro medio ambiente sano y más limpio nos ha llevado a desarrollar materiales que sean capaces de eliminar ciertos contaminantes que afectan nuestros hábitats naturales; el agua es un recurso no renovable que es necesario para el surgimiento de la vida y el desarrollo de todas las especies vivientes (7).

La fotocatalisis es una alternativa viable para eliminar los contaminantes de los efluentes de las aguas contaminadas, ha demostrado ser mejor que los otros métodos de eliminación de colorantes artificiales, esto se debe a que para llevar a cabo este proceso se puede usar luz solar o artificial, es más eficiente porque aumenta la velocidad de reacción usando catalizadores, algunos catalizadores que se pueden utilizar son las perovskitas, algunos de estos materiales presentan características optoelectricas, estas propiedades se pueden activar con la luz para llevar a cabo la reacción (6). Es un proceso el cual nos permite eliminar una gran parte de los contaminantes orgánicos mediante la oxidación y reducción, ha sido utilizado en otras aplicaciones y ha demostrado ser bastante eficiente. Desde el punto de vista económico este proceso es más rentable que los demás medios de eliminación.

La importancia de este trabajo radica tener una solución más para tratar aguas residuales que contengan colorantes artificiales como azul de metileno; cabe mencionar que el método de eliminación que se emplea es más eficiente y fácil de manejar que otros métodos convencionales.

El método empleado para la elaboración del catalizador (CaTiO_3) es la ruta sol-gel, porque esta aumenta las capacidades de fotocátalisis del material, las ventajas que tiene este método es que se puede controlar su temperatura, debido a esto se puede conocer las propiedades que el material poseerá, como se requiere para fines de fotocátalisis se empleará el método sol-gel porque favorece las capacidades ópticas de la perovskita. Además el material ha sido utilizado para eliminar otros contaminantes de agua como la marea verde lo que demuestra que tiene altas capacidades ópticas (8, 9).

1.3. Preguntas de investigación

¿Qué efecto tiene el método de síntesis del material en la conservación del medio ambiente?

¿Cómo influye el método de síntesis empleado en las propiedades fotocatalíticas del material?

¿Qué acciones se podrían realizar para mejorar la degradación fotocatalítica utilizando titanato de calcio?

1.4. Hipótesis

El titanato de calcio (CaTiO_3) sintetizado por el método químico de sol-gel, con ajustes en la temperatura de evaporación de solventes y tiempo de gelación, es una de las perovskitas que por sus propiedades estructurales, ópticas y catalíticas permite llevar a cabo la degradación del contaminante azul de metileno hasta con un 90% de eficiencia (10).

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo General.

Degradar azul de metileno mediante fotocátalisis empleando CaTiO_3 como catalizador, modificando la temperatura del método de síntesis (sol-gel) para disminuir el tiempo de reacción.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Obtener polvo de CaTiO_3 por medio de la metodología sol-gel, empleando en la ruta de síntesis precursores como nitratos y alcóxidos.
- Analizar las propiedades estructurales y ópticas del CaTiO_3 mediante difracción de rayos X y espectrofotometría UV-Vis.
- Evaluar la degradación fotocatalítica del azul de metileno empleando CaTiO_3 mediante el análisis del espectro de absorción de UV-Vis.

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1. Contaminantes De Efluentes.

La contaminación es la presencia de uno o más contaminantes en el medio ambiente o cualquier combinación de ellos que pueden ocasionar un desequilibrio biológico (11).

Actualmente, la contaminación de efluentes es un tema de vital importancia, con el aumento de las diferentes industrias y el crecimiento de la población urbana, el uso de productos como detergentes, colorantes, agua para uso agrícola, agua de uso industrial, provocó que desechos de esta naturaleza acabaran en ríos lagos y mares. Una característica de estos contaminantes es su difícil eliminación. Como se componen de una alta gama de compuestos químicos, farmacéuticos, aditivos industriales, productos de cuidado personal, la mayoría estos compuestos no reciben tratamiento antes de

desechados por las tuberías, dado que no se cuentan con legislaciones ambientales para estos, además de otros como precursores químicos para crear nuevos materiales, es un problema mayor por la falta de información de daños que pueden ocasionar a la salud de las personas o al medio ambiente, que es el próximo a recibir las descargas de estos compuestos (12).

Alrededor del mundo se usan más de 10 mil tipos de colorantes sintéticos y pigmentos, se usan principalmente en industrias como la textil, farmacéutica, cosmética, papelera, entre otras. Sin duda la que más contaminación genera es la industria textil, este tipo de contaminación se caracteriza por los grandes contenidos de materiales y elevados parámetros como un elevado pH, la intensidad del color, demanda química de oxígeno (DQO) y alto contenido en sales, muchos de estos compuestos provienen de la fabricación de fibras; algunos parámetros que presentan estos desechos son los siguientes (13).

- Demanda química de oxígeno (DQO): (800-1600 mg/L)
- Color visible (1100-4500 unidades)
- pH alcalino (9-11)
- Sólidos totales (6000-7000 mg/L)

Muchos colorantes utilizados en la industria no se pueden remover por métodos convencionales de tratamiento de agua y se les conoce como contaminantes persistentes, aproximadamente del 2 al 50 % de estos se desechan al agua por su manejo tan complicado, el mayor consumo de agua durante el proceso de fabricación de prendas de vestir son el blanqueado, el calentamiento y el teñido; este último es donde se genera la principal contaminación de agua por uso de tintes, estudios realizados han demostrado que muchos tintes usados en la industria textil pueden tener un tiempo de vida media de entre los 19 y 46 años a 25 °C y un pH=7, la estructura química de las moléculas de colorantes son bastante resistentes a la radiación solar o tratamientos químicos y algunos casos son resistentes a la eliminación microbiana, investigaciones han revelado que ciertos grupos azo que conforman estos colorantes son cancerígenos y mutagénicos, lo que provoca que sus tratamientos sean incluso más contaminantes que los propios tintes (13, 14). El vertido de grandes cantidades de aguas residuales

provoca que haya una reducción en la concentración de oxígeno disuelto en el agua por la poca luz solar que puede penetrar (9).

La naturaleza de los colorantes y pigmentos es muy variada, se le llama colorante a aquel que se puede disolver en agua, pero dependiendo del medio donde se disuelve puede clasificarse de manera diferente, aunque la principal forma de diferenciarlos es por su solubilidad, estas sustancias se agrupan en sintéticas y naturales (11).

Los que son de origen sintético presentan una mayor dureza en ambientes húmedos, dan un mayor color, son fáciles y baratos de producir, tiene una alta solubilidad, resistencia al agua y a la luz solar, estas propiedades los convierten en los favoritos de diversas industrias como la textil, cueros, pintura, imprenta, entre otras; mientras que los de origen vegetal son muy difíciles de obtener son perecederos en comparación con los de origen sintético (11).

En México, la industria textil es una de las manufactureras más grandes que hay, debido a que aporta el 10% de PIB del país, lo que coloca al país como el quinto proveedor de ropa a nivel mundial, la mayor parte de la contaminación se genera durante el blanqueado del algodón y el proceso del hilado de las fibras lo que puede llegar a contaminar grandes cuerpos de agua y el suelo, así como causar eutrofización (15).

2.1.1. Azul De Metileno.

El azul de metileno se sintetizó por primera vez en el año 1876 por Heinrich Caro, usando como base la anilina, este material fue uno de los precursores principales para la creación de diferentes tintes; estos tintes fueron sintetizados por William Perkin en 1856, se usó principalmente para la industria textil (16).

Es un polvo cristalino de color verde que al disolverlo en agua o alcohol se torna de color azul, es estable y no tiene olor; es un colorante ampliamente usado en diversas industrias, es de carácter orgánico, se usa para tratamiento de algunas enfermedades, fabricación de productos de limpieza, fabricación de ropa, entre muchas más, en el análisis químico sirve como indicador redox, además que fue el primero de estos

compuestos en ser usados en el tratamiento de algunas enfermedades como la psicosis, depresión, ansiedad, déficits cognitivos, Alzheimer, entre otras más (17). En ambientes oxidantes conserva su color azul y en reductores se decolora. En la industria textil y alimentaria se usa en grandes cantidades, cuando este colorante se desecha en algún cuerpo de agua este se tiñe y se contamina, lo que provoca una coloración diferente a la habitual (18).

Este tinte es un compuesto heterocíclico aromático, su fórmula molecular contiene carbono, hidrógeno, cloro, oxígeno, nitrógeno y azufre ($C_{16}H_{18}ClN_3S$), por su estructura molecular (Figura 1) es un antioxidante y así puede autooxidarse donando electrones a otros compuestos, también tiene capacidad fototóxica, ya que en presencia de rayos UV produce oxígeno, su peso molecular es de 31.985 g/mol y tiene un punto de fusión hasta los $100^{\circ}C$ (19).

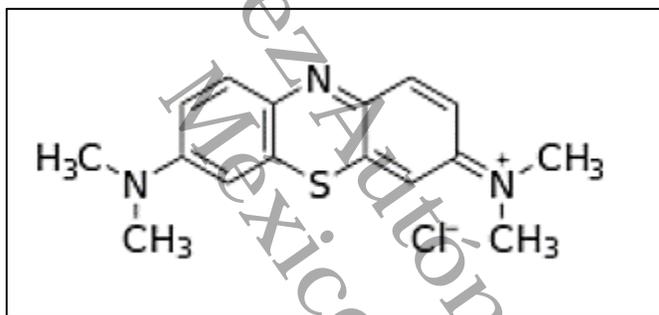


Figura 1: Estructura Química del azul de metileno (19).

Debido a la naturaleza de los colorantes, los tratamientos actuales para decolorar estos residuos son ineficientes, hay diferentes métodos alternativos a los tratamientos biológicos tradicionales, aunque se puede realizar mediante otros métodos como: intercambio iónico, coagulación, precipitación química, ozonización, ósmosis inversa, oxidación avanzada y adsorción, entre otras. En la industria los métodos más utilizados para tratar estas aguas contaminadas son la coagulación o utilizando agentes absorbentes, sin embargo, los lodos o el residuo generado por estos tratamientos también resulta altamente contaminante, por lo que también requieren un tratamiento adicional (11).

Actualmente se buscan alternativas para el tratamiento de estos residuos tóxicos, dichos procesos son bastante novedosos y económicos, los fotocatalizadores son unos de estos materiales, puesto que utilizan la luz solar como fuente de energía, tienen la ventaja que no generan contaminación y sirve para reducir y oxidar contaminantes que se encuentran en el agua (19).

Este compuesto es muy peligroso cuando se desecha en cuerpos de agua que tengan plaguicidas y fertilizantes, estos compuestos tienen contenidos de grupos azo lo que provoca mayor grado de toxicidad; se ha demostrado que también causa daños a la salud como el aumento del ritmo cardiaco, vómitos, mareos, la cianosis y la necrosis de tejido expuesto, se ha demostrado que este compuesto es mutágeno lo que hace que sea altamente cancerígeno, esto convierte a este compuesto en un problema de salud pública (20).

2.2. Fotocatálisis.

Se remonta al siglo pasado, la reacción de fotocatálisis fue descubierta por el entonces estudiante de doctorado Fujishima Akira y su supervisor el Dr. Honda Kenichi. Este fenómeno provocaba que se produjera oxígeno e hidrógeno (hidrólisis) cuando se colocaba óxido de titanio dentro del agua y se irradiaba con luz, de este modo ocurría una reacción de tipo redox (reducción-oxidación), desde entonces este proceso fue conocido como el efecto Honda-Fujishima. Una de las principales características de este nuevo método es la capacidad de remover contaminantes del agua sin la necesidad de utilizar mucha energía. Este proceso se ha visto como una posible alternativa para la obtención de hidrógeno a partir de petróleo (21).

La fotoquímica, rama de la química que estudia los efectos de la luz visible sobre las moléculas, se ha aplicado de manera limitada a pesar de diversas formas de convertir la luz solar en energía eléctrica. La mayoría de las moléculas no absorben luz ultravioleta debido a la bloqueo de la capa de ozono, lo que hace que la luz solar directa sea ineficiente. La radiación visible que llega a la superficie está en el espectro de 400 a 600 nm. Para aprovecharla, se necesita un catalizador capaz de absorber luz en longitudes

de onda más cortas, transfiriendo la energía al sustrato mediante transferencia de energía o electrónica. Esto desencadena una reacción química, permitiendo que el catalizador se restaure y se inicie el proceso de catálisis (22).

La catálisis, que modifica la velocidad de reacción, utiliza un catalizador que no participa químicamente y acelera la reacción, reduciendo la energía necesaria. El catalizador no se considera producto ni reactivo, ya que vuelve a su forma original después de la reacción, permitiendo su reutilización y haciendo que el proceso sea más económico y genere menos residuos, ya que una sola molécula del catalizador acelera la reacción (19, 23)

Cuando el catalizador necesita fotones para llevar a cabo la reacción se nombra como fotocatalizador, estos materiales son capaces de oxidar o reducir moléculas orgánicas e inorgánicas, si la fuente de energía es capaz de donar los fotones necesarios el proceso se puede llevar a cabo (23).

Existen varios tipos de catalizadores, la manera más práctica de diferenciarlos es por su forma física y se pueden clasificar en homogéneos y heterogéneos (23).

- **Los catalizadores homogéneos** se disuelven junto con los reactivos, por ello tienen una mayor superficie de contacto con los reactivos y por eso su velocidad de reacción se ve más acelerada, sin embargo, el tratar de separar el catalizador del producto o los reactivos sobrantes es algo bastante difícil de hacer (23).
- **Los catalizadores heterogéneos** tienen una gran ventaja que no se mezclan con los reactivos, separar los catalizadores de la reacción es más fácil ya que son sólidos y solo hay que extraerlos, pues solo entran en contacto con la reacción, su fácil separación y purificación hace que sea la más usada en la industria (23).

La fotocatalisis es una reacción catalítica la cual involucra absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. En esta la reacción se ve acelerada de manera considerable con la presencia de un catalizador, se descubrió gracias a la electrólisis del agua con óxido de titanio. Este proceso inicia cuando un material semiconductor absorbe un electrón de igual o mayor energía en la banda prohibida (band gap), lo que ocasiona un hueco en la superficie del material irradiado con el haz de luz, esto provoca que se

generen pares iónicos e^- y h^+ , este para se les conoce como excitones, es aquí en donde se lleva a cabo la reacción ya sea de oxidación o reducción (redox) (24).

Es una de las maneras más comunes de transferencia de electrones desde un semiconductor en su estado excitado hacia el sustrato, dando lugar a aniones o cationes radicales, cuando se está en el estado excitado existen cuatro maneras de transferir electrones denominados de la siguiente manera: mecanismo oxidativo del fotocatalizador, mecanismo reductivo del fotocatalizador, mecanismo reductivo del sustrato y formación de complejos dador-aceptor (24).

Cabe mencionar que estos procesos son de tipo foto-redox y sirven principalmente para fotocatalisis homogénea; en el año 2012 se desarrolló una alternativa de transferir energía a la reacción, sin la transferencia de electrones, esta cuenta con cierta ventaja sobre las demás formas, debido a que la diferencia principal radicaba en que al transferir electrones las sustancias involucradas deben contar con ciertas propiedades electrolíticas, sin embargo, con el nuevo método, se transfería energía y las propiedades requeridas eran irrelevantes (22).

La fotocatalisis tiene diversas aplicaciones uno de sus mayores usos es la eliminación de contaminantes acuosos del agua, colorantes artificiales, reacciones de óxido-reducción, purificación de aire interior, efecto biocida-fungicida bactericida, hasta descontaminación de aire urbano, propiedades autolimpiantes, entre muchas otras (24).



Figura 2: Activación mediante proceso foto-redox (22).

La fotocatalisis tiene varios factores que influyen en su proceso, estos factores son los siguientes:

- **Energía de la banda prohibida:** la banda prohibida se refiere a la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción. Dicho de otra manera, es la energía necesaria para activar el proceso (19, 25)
- **Formación del par electrón-hueco:** este proceso inicia cuando la superficie del semiconductor es irradiada con un haz de luz excitando al electrón y permitiéndole moverse libremente provocando la formación de pares iónicos, facilitando así llevar a cabo la reducción o la oxidación (19, 24, 25).
- **Área superficial:** este factor es muy importante ya que entre más grande sea mayor será el número de sitios activos, esto aumenta la actividad fotocatalítica (19).
- **pH del medio:** tener un pH ácido ayuda a evitar la recombinación de electrones, así ayuda en la formación del par hueco- electrón (19).
- **Longitud de onda de radiación:** La radiación infrarroja se extiende desde el borde nominal rojo del espectro visible a 700 nm hasta 1 mm. Este rango de longitudes de onda corresponde a un rango de frecuencia de aproximadamente 430 THz hasta 300 GHz (19).

No hay que confundir la catálisis con la fotocatalisis, la catálisis sirve para acelerar reacciones con energía libre Gibbs con reacción negativa ($\Delta G < 0$); por otra parte, la fotocatalisis sirve para suministrar energía ($\Delta G > 0$) (24).

2.2.1. Fotocatalisis Homogénea.

En los procesos homogéneos los reactivos y los catalizadores están en la misma fase, los más comunes son fenton y ozono, y este tipo de fotocatalisis es más eficiente en cuanto a consumo de energía, por lo que no se necesita la compra de lámparas UV costosas, pues puede utilizar la luz solar con una sensibilidad de hasta 450 nm. Una de

sus ventajas es que al ser homogéneos el reactivo como el catalizador, tiene mayor área de contacto lo que ayuda a que la reacción sea más rápida y efectiva (22, 26)

Este proceso se usa mucho en la industria, tiene desventajas como sus bajos niveles de pH necesarios para usarlo y una de las más importantes tiene que ver con la naturaleza de la reacción, ya que los reactivos y el catalizador están en la misma fase, una vez que la reacción termina separar ambos componentes es complicado y se debe recurrir a otros métodos para separar el catalizador del producto (22).

2.2.2. Fotocatálisis Heterogénea.

Se basa en la absorción directa de luz ultravioleta mediante un sólido (catalizador), se define como la aceleración de la fotorreacción, el catalizador se activa con la radiación de la luz, después de esto los electrones del semiconductor que en estas reacciones están en fase sólida, se excitan donando uno y creando un hueco en la superficie del catalizador por el que se inicia la reacción, este proceso se mantiene de manera que el semiconductor se recompone tras donar sus electrones (27).

El catalizador y los reactivos están en fases diferentes y su extracción tras una reacción es más fácil, pueden encontrar muchas aplicaciones como tratamientos de agua residuales, deshidrogenación, deposición de metales, eliminación de contaminantes gaseosos, reacciones de oxidación leves o totales que permiten la formación de grupo OH (28).

2.3. Método Sol-Gel

Crear un material nuevo tiene muchas complicaciones desde las etapas como el diseño, la síntesis y el estudio del material para determinar las posibles propiedades que este pueda tener, la etapa del diseño y la síntesis van de la mano, debido a que se parte de estudios y métodos experimentales ya conocidos, la parte complicada en el desarrollo de nuevos materiales es que no hay una metodología establecida por lo tanto se abre la

posibilidad de manipular variables durante el proceso siguiendo un orden de manera meticulosa (29).

Existen numerosas vías para sintetizar materiales sólidos policristalinos, por un lado tenemos al método cerámico y por el otro al método blando, el primero es usado ampliamente y es conocido como método de estado sólido, este método requiere de cantidades exactas de precursores químicos y que los materiales obtenidos se trituren en morteros, además, para obtener el material es necesario que pase por varias etapas de secado y se maneja a elevadas temperaturas durante periodos de tiempo prolongados, se necesitan hornos especiales para el tratamiento por esta vía, esto ocasiona un gran consumo energético; los métodos blandos son muy utilizados por las bajas temperaturas que maneja, las propiedades que se obtiene por esta vía son bastante ventajosas puesto que se puede obtener partículas de menor tamaño, los métodos de tipo sol-gel presentan cambios tanto físicos y químicos, la parte sol es la mezcla de las soluciones precursoras y la parte gel es la transformación de la parte sol a un estado sólido, otros cambios físicos que ocurren en este proceso es la hidrólisis, gelificación, polimerización y el secado (29).

El método sol-gel es una técnica utilizada para sintetizar materiales inorgánicos, cerámicos y vidrios a partir de soluciones coloidales (sol) que se transforman en una red tridimensional de partículas (gel) mediante la polimerización y posterior secado o síntesis. Se pueden obtener a partir de alcóxidos metálicos y sales inorgánicas para llegar a la estructura del óxido. Este proceso ofrece ventajas, como la posibilidad de obtener materiales con propiedades controladas, alta pureza y una amplia gama de composiciones, el método sol-gel ha sido ampliamente utilizado en la síntesis de materiales para aplicaciones diversas, como recubrimientos, catalizadores, sensores, materiales ópticos y biomateriales, entre otras (30, 31).

Los primeros precursores de estos materiales fueron los alcóxidos metálicos, sintetizados en 1846, sin embargo, hasta la década de 1930 se vio que podían usarse para obtener óxidos. En la década de los 60 y 70 la industria de la cerámica se interesó en los geles por la facilidad de obtener óxidos, no obstante, el *boom* de la química sol-gel no se dio sino hasta finales de la década de 70 cuando Yoldas demostró que con un

secado cuidadoso de los geles se podía obtener monolitos de los óxidos. Una de las características principales del método sol-gel es la particularidad de controlar el proceso de síntesis desde los precursores hasta el producto (31).

El proceso sol-gel consisten en tres partes sol, gel y gelación, a continuación, se detalla cada una de ellas.

- La parte sol consiste en la formación de partículas sólidas en un líquido, para conformar los soles se utiliza normalmente una mezcla de agua y alcohol (31).
- El gel consiste en una malla tridimensional con poros interconectados y que solo está limitada por el tamaño del recipiente que la contiene; se nombra gel coloidal si está formado por partículas coloidales y se le llama polimérico, si está formado por unidades química subcoloidales (31).
- Por último, la etapa de gelación, esta última consiste en que el gel se vuelva más rígido con la formación de cadenas poliméricas, esto sucede cuando el líquido pasa a un estado más viscoso dice que ha gelado (31).

Una vez que se ha formado el gel, se debe eliminar el solvente y consolidar la estructura en red. Esto se puede lograr a través del secado a baja temperatura o la sinterización a temperaturas más altas, dependiendo del material que se esté sintetizando. En algunos casos, el material resultante puede requerir etapas adicionales de procesamiento, como la calcinación o el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades finales (30, 32).

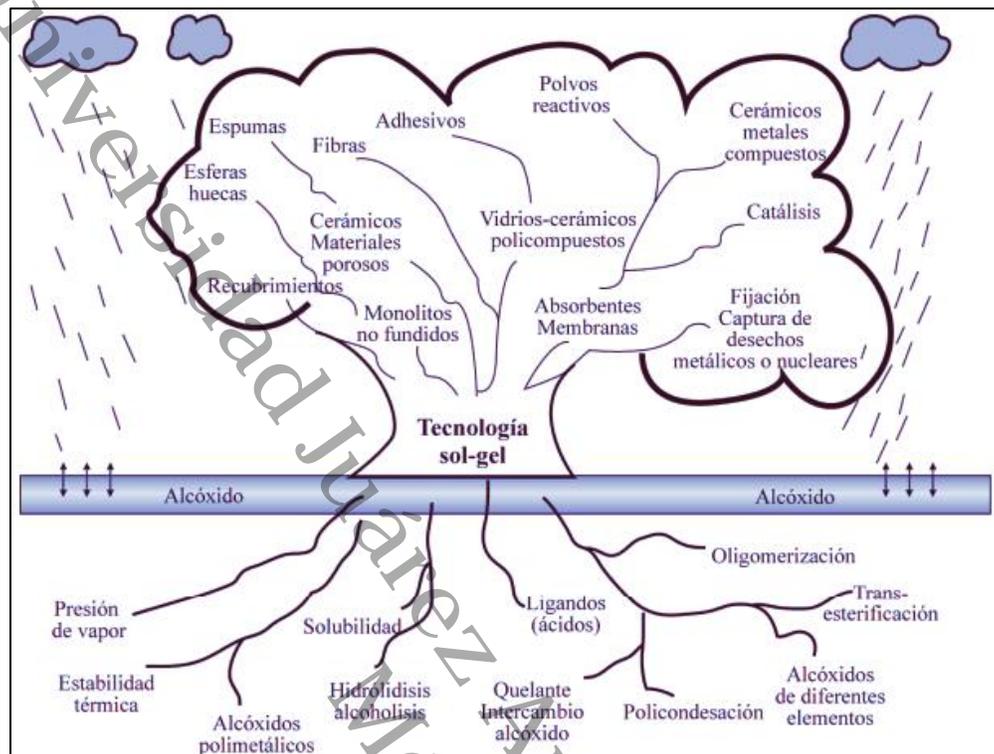


Figura 3: Esquema general del proceso sol-gel y sus aplicaciones (33).

Las grandes ventajas que tiene el proceso son la variedad de materiales que se pueden sintetizar y la facilidad que otorga para manipular las propiedades del material, así como su estructura, tener el control sobre la estructura del material es de vital importancia y hace que este método sea bastante eficaz, manipular la síntesis ayuda a controlar el tamaño de los poros y su espesor de pared, conociendo estas características del material se puede conocer cuáles serán sus utilidades, hay muchas aplicaciones algunos ejemplos son: preparación de películas delgadas y recubrimientos o polvos nanocrystalinos, compuestos inorgánicos/orgánicos versátiles y materiales ópticos de alta calidad, entre otras (33).

Otra ventaja de este método es la fácil evaporación de sus precursores como los alcóxidos además de su fácil purificación, así como la alta porosidad que el material presenta y puede ser tanto amorfos como nanocrystalinos, sin embargo, una de las grandes desventajas que tiene este proceso es que a pesar de manejarse a bajas

temperaturas el coste de los precursores es bastante alto y también que no se pueden producir a gran escala además del cuidado del secado del material (33).

2.4. Perovskitas.

Son materiales cerámicos que tienen propiedades optoelectricas, fueron descubiertas en los montes Urales en Rusia en el año 1839, por Gustav Rose, mineralista y químico de origen alemán, recibieron ese nombre en honor a Lev Alexeievich Perovski militar de origen ruso (34, 35). El titanato de calcio (CaTiO_3) fue la primer perovskita, años después se convertirían en una vasta familia de minerales sintéticos y naturales, que muestran un sinfín de propiedades que van desde aislantes a metálicas, además de semimetálicas, conductoras electrónicas de espines polarizados, superconductoras, entre otras. Son materiales multifuncionales, dado que algunas poseen propiedades catalíticas y eléctricas, y algunas otras poseen diversas propiedades a la vez, gracias a que tienen estas propiedades los convierte en materiales con un potencial para diferentes aplicaciones tecnológicas ya sea en el campo de la electrónica o química (29).

La estabilidad de las moléculas de perovskitas depende del tamaño de la separación entre los átomos que la conforman, así como por su forma geométrica, se considera que el material es una perovskita cuando la tolerancia entre los espacios es de 0.75 y 1.13, se puede calcular con la Ec. 1, esta ecuación es conocida como el factor de tolerancia de Goldschmidt la que sirve para determinar si es factible o no hacer el arreglo tipo perovskita, donde: R_A , R_B y R_O son los radios iónicos de los cationes A, B y el oxígeno (9, 29)

$$t = \frac{R_A + R_O}{\sqrt{2(R_B + R_O)}} \quad \text{Ec. 1}$$

Estos materiales son poco comunes en la naturaleza y su familia es pequeña, su estructura es la mejor para los materiales avanzados, aunque también es una de sus principales desventajas por su ordenamiento son sus elementos A y B (34, 35). Su fórmula básica es ABX_3 las letras A y B corresponden a cationes de tamaños diferentes siendo el de mayor tamaño el catión A seguido del B, en su forma cúbica los cationes A ocupan el centro de la estructura y los B las esquinas y por lo regular los aniones X

ocupan las aristas del centro de los cationes B, esto permite que se formen octaedros alrededor de estos. Los cationes A pueden ser el Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Zinc (Zn) entre otros elementos, mientras que los cationes B ocupan más de 50 elementos de la tabla periódica y los aniones X suele ser oxígeno, no obstante, también puede ser cualquier elemento que se encuentre en el grupo de los halógenos, en la Figura 4 se puede observar la estructura tipo perovskitas (36). Estos materiales han despertado gran interés en la comunidad científica por la amplia variedad de propiedades que poseen, son una alternativa para la obtención de energía renovable, tratamiento de aguas residuales, aire entre otras (9).

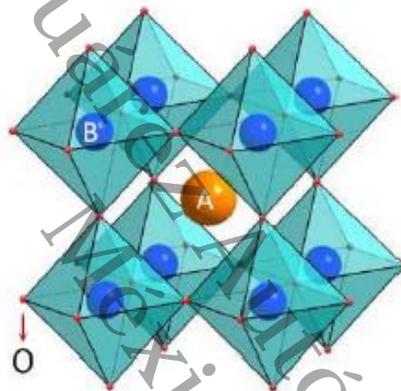


Figura 4: Estructura tipo perovskita (36).

Dentro de este grupo de materiales hay diferentes tipos de estructuras y se caracterizan principalmente por sus propiedades.

- **Cobaltitas:** son las que despiertan mayor interés en el ámbito científico, están basadas en elementos de valencia mixta como el cobalto (Co) y el manganeso (Mn), una de sus propiedades físicas es su transición de metal aislante (9).
- **Ferroeléctricos:** una de las propiedades más importantes que presenta una estructura tipo perovskita es la ferroeléctricidad, esta propiedad se da cuando ocurre un desplazamiento entre los cationes A y B respecto a los oxígenos que forman el material, esto provoca una polarización espontánea (9).

- **Organometálicos:** estos son nuevos materiales con la estructura tipo perovskita y están compuestos por elementos orgánicos- inorgánicos, son denominados híbridos paraeléctricos, se aplican en celdas solares, su estructura se conforma de un catión A orgánico de tipo metilamonio, el B es un catión metálico divalente y el catión X es un haluro (9).

Existen muchos métodos de síntesis de materiales tipo perovskita, el proceso que se elija esta relacionado con las propiedades que se quiere que tenga el material, si se necesita que el material tenga propiedades eléctricas entonces se usan métodos físicos y si necesita que tenga capacidades ópticas entonces se usan métodos químicos. A continuación se detallan algunos métodos (9).

Método de combustión: Es un proceso exotérmico, generalmente se usan óxidos metálicos como precursores además de un combustible de origen orgánico y en ocasiones agua como solvente. La mezcla de los precursores es seguida por un calentamiento a baja temperatura que favorece la combustión de los reactivos, en este instante y por un período corto de tiempo se alcanzan temperaturas elevadas junto con la liberación de gases, por ejemplo, CO_2 , H_2O y N_2 (9).

Método de reacción en estado sólido: Este método usa generalmente óxidos, carbonatos y nitratos, se usa principalmente para obtener materiales policristalinos. Los precursores se mezclan para hacer una interdifusión atómica entre ellos y después ser llevados a un tratamiento térmico a alta temperatura (9).

Síntesis por plasma: Es usado para la obtención de películas, se inserta los precursores en polvo a un horno donde se eleva la temperatura en un arco de plasma. Una forma de producir plasma es a través de una descarga eléctrica, en esta forma, se puede obtener un plasma térmico o un plasma frío, el cual está relacionado con un plasma en equilibrio y otro en no equilibrio termodinámico, respectivamente (9).

Síntesis hidrotermal: El proceso hidrotermal es una reacción química heterogénea que se lleva a cabo en presencia de un solvente que puede ser acuoso o no y la cual se realiza por encima de la temperatura ambiente y condiciones de presión superior a una atmósfera en un sistema cerrado. Las técnicas fundamentadas en métodos

hidrotermales involucran a un precursor metálico disuelto en un líquido, dentro de un recipiente cerrado, que es calentado por encima de su punto de ebullición, lo que genera una presión superior a la atmosférica (9).

Síntesis hidrotermal asistida por microondas. Los primeros estudios sobre la síntesis hidrotermal de materiales asistida por microondas se llevó a cabo por Komarneni, quien sintetizó una serie de partículas cerámicas y electrocerámicas. Las características más destacadas de este método están relacionadas con los tiempos de reacción más cortos, obtención de partículas finas y monodispersas como resultado del calentamiento volumétrico, el cual elimina los gradientes térmicos que se presentan en el caso del calentamiento convencional (9).

Electro hilado: La técnica de electro hilado ha sido utilizada para la fabricación de componentes en las pilas de combustible de óxido sólido, se presenta como una óptima técnica de fabricación dado que constituye un medio continuo para el transporte de cargas, gracias a una elevada superficie, una refinada permeación de gases y una alta densidad de puntos triples. El método de electro hilado está fundamentado en la aplicación de un campo eléctrico entre la punta de una jeringa y el colector de corriente (9).

El titanato de calcio pertenece a esta familia, es un material cerámico con estructura perovskita, tiene propiedades eléctricas y ópticas, se puede utilizar como elemento de resistencia térmica, puede sintetizarse por el método sol-gel y es una de las maneras más económicas que existen de obtenerla (35).

2.4.1. Titanato De Calcio (CaTiO_3).

El titanato de calcio pertenece a la familia de las perovskitas, su estructura cristalina depende de la temperatura a la que se lleve a cabo su síntesis, si se maneja una temperatura por debajo de 1380 K presente una estructura ortorrómbica, si se usan temperatura de entre 1380 K y 1500 K entonces la estructura ortorrómbica pasa a ser

una tetragonal y por encima de una temperatura de 1580 K, esta adopta una estructura cúbica (35).

Es un material que pertenece a la familia de las perovskitas por su estructura, esta presenta una configuración A, B, X₃, donde la letra A corresponde al calcio, la B al titanio y la letra X₃ normalmente corresponde al oxígeno que se encuentra en su configuración, fue la primera en ser descubierta y en llevar este nombre, de ahí los demás materiales descubiertos o creados con una estructura similar formaron una familia, este material tiene propiedades optoelectrónicas, fotocatalíticas, ferroeléctricas, entre otras, estas propiedades convierten a este material en un candidato para aplicaciones eléctricas y ópticas (37). Aquí se explican algunas de esas propiedades:

- **Dieléctricas:** El titanato de calcio tiene una constante dieléctrica alta, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en las que se requiere almacenamiento de energía eléctrica (37).
- **Ferroeléctricas:** Puede exhibir ferroelectricidad a temperaturas específicas, lo que lo convierte en un material interesante para aplicaciones de memoria no volátil (37).
- **Alta constante dieléctrica:** Esto lo hace adecuado para su uso en condensadores de alta capacitancia (37).

Se ha reportado que puede ser sintetizado de diferentes maneras como la síntesis hidrotérmica convencional, la reacción en estado sólido y el método sol-gel, este último método es el más fácil de realizar puesto que su temperatura de reacción se puede modificar para hacer más rápida la síntesis del material, además que supone un gasto energético menor que los demás métodos (36). Desarrollar una nueva manera de crear un material es bastante complejo debido a que implica ensayo y error. Algunos usos que ya se le dan a este material se describen a continuación:

- EL CaTiO₃ se utiliza en aplicaciones como condensadores cerámicos de alta capacitancia, dispositivos de microondas como resonadores y filtros.

Dentro de los procesos fotocatalíticos, se puede encontrar que este material se puede emplear para la reducción de contaminantes dispersos en el agua, tal es el caso de la

eliminación de la marea verde, dicho experimento obtuvo buenos resultados, la finalidad de este experimento era la ampliación del uso del CaTiO_3 en nuevas aplicaciones, tales como la producción de hidrógeno mediante la disociación catalítica del agua (8).

2.5. Rayos X

La difracción de rayos X o por siglas DRX, se utiliza en la caracterización de diferentes materiales, como cerámicos, minerales, aleaciones, materiales catalíticos, metales, entre otros; los rayos X fueron descubiertos en el año 1895 por el Wilhelm Conrad Roentgen, al inicio de su aplicación fueron utilizados ampliamente en el campo de la medicina, en la actualidad se utiliza ampliamente en la nanociencias, principalmente por la información que se obtiene con los análisis estructurales esta información suele ser en forma de difractograma, que sirve para determinar la forma cristalina del material, mediante el análisis de los patrones de difracción (37).

Para caracterizar los polvos se utiliza un equipo de difracción de rayos X, este equipo arroja los picos de difracción, estos son utilizados para evaluar el orden estructural de la especie estudiada.

2.6. UV-Vis

La espectroscopia UV-Vis, es una técnica que se usa en industrias ampliamente conocidas como la de los alimentos, químicas, farmacéuticas y muchas más, se utiliza también para determinar la cantidad de solutos en una solución. Su principal fundamento se basa en la cantidad de radiación que puede absorber una molécula y longitud de onda, esta característica depende ampliamente de la estructura atómica de la molécula y las condiciones del medio donde se encuentra como el pH, pureza, temperatura, fuerza iónica entre otras (38).

Las moléculas pueden absorber energía luminosa y almacenarla por lo que esto provoca que los electrones que almacenan esta energía pasen de estar en un estado basado a un estado excitado o de máxima energía. Cada molécula tiene un estado excitado (banda) diferente lo que hace que se diferencien de otras, por esa razón las moléculas

presentan diferentes absorciones de longitudes de onda, en Figura 5 podemos observar las diferentes longitudes de onda (36, 38).

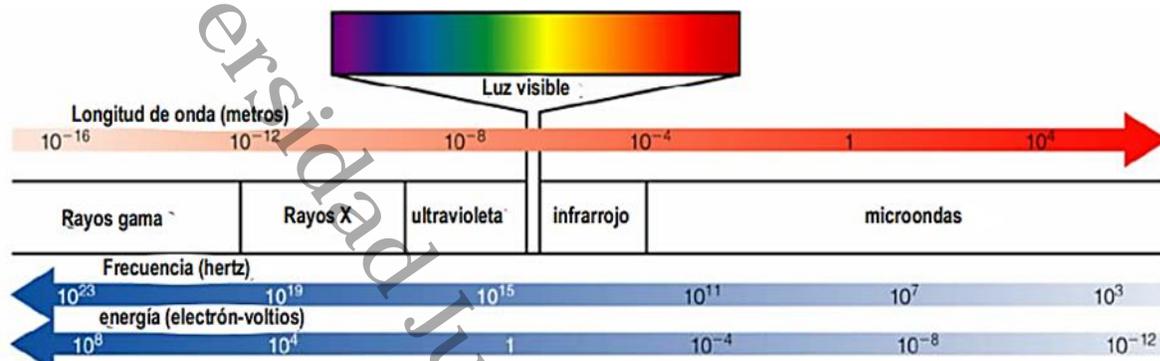


Figura 5: Espectro electromagnético (38).

La región UV se encuentra entre los 195 nm a 400 nm, esta región provoca daño al ojo humano incluso quemaduras, pues es una zona de energía muy alta, los compuestos que tienen enlaces dobles, triples, peptídicos, aromáticos y grupos carbonilos, tiene una mayor absorbancia en la región UV puesto que aquí es donde se puede determinar de manera cualitativa y cuantitativa compuestos orgánicos. La región visible se ubica, en esta región apreciamos el color visible de una solución y que corresponde a las longitudes de onda de luz que transmite, no que absorbe. El color que absorbe es complementario del color que transmite, para realizar mediciones de absorción es muy importante utilizar la longitud de onda en la que absorbe luz de la solución (38) .

Para poder construir un espectro de absorción de luz se representa mediante una gráfica de absorción de luz a diferentes valores, esta propiedad de absorción de luz se mide en un aparato llamada espectrofotómetro, en este instrumento la solución se mete dentro de un prisma al que se le irradia una fuente de luz, esta se medirá en diferentes longitudes de onda frente al blanco que contenga el disolvente de la solución a caracterizar (38).

Capítulo 3: Desarrollo Experimental.

3.1. Síntesis De Perovskita (CaTiO_3).

Para obtener los polvos de titanato de calcio, se utilizó el método sol-gel, que consiste en la mezcla de dos soluciones precursoras, la solución A se compone de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, y la solución B se compone de $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ y $\text{Ti}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$, esta mezcla se tendrá en constante agitación en una parrilla, para después adicionarle 0.5 mL de ácido acético que sirve como estabilizador de la solución B, seguidamente la mezcla fue vertida en tubos de ensaye de manera uniforme, en un reactor digital modelo HACH DRB-200, para evaporar el solvente de la solución AB a una temperatura de $100\text{ }^\circ\text{C}$ durante aproximadamente dos horas y media, El gel obtenido fue secado a una temperatura de $150\text{ }^\circ\text{C}$ durante 16 horas, el polvo obtenido de tono ocre, fue tratado térmicamente en un horno tubular modelo GSL-1100X a $900\text{ }^\circ\text{C}$ durante una hora. Después se trituraron las muestras en un mortero de ágata.

3.2. Caracterización De Polvos (CaTiO_3).

3.2.1. Caracterización Estructural (DRX).

Para la identificación de la fase cristalina se llevó a cabo por medio de rayos X utilizando un equipo D8 ADVANCE BRUKER, con una fuente de radiación Cu-K ($\lambda=1.54056\text{ (\AA)}$); en un rango de 2θ de 10° a 70° y un paso angular de 0.02 por un tiempo de exposición de 0.4 s (10).

3.2.2. Caracterización Óptica (UV-Vis).

Para determinar el ancho de banda prohibida se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV 2600, que permite evaluar la luz que es absorbida, los valores de reflectancia se convirtieron en absorbancia mediante la función Kubelka-Munk (10).

3.3. Experimentos Fotocatalíticos.

3.3.1. Fotocatálisis Empleando CaTiO_3 .

Para los experimentos fotocatalíticos se realizó una solución de azul de metileno 0.0267 mM en un volumen de 250 mL, a la cual se le agregó 0.125 g de CaTiO_3 sintetizado por el método sol-gel. Se agitó antes de la irradiación (10).

A continuación, la muestra fue irradiada con luz ultravioleta (254 nm y 11 W) en una cámara oscura en agitación. Las muestras fueron tomadas en un intervalo de 30 minutos durante 360 minutos para su posterior evaluación en un espectrofotómetro Agilent modelo 8453 (10).

Se agitó antes de la irradiación con luz ultravioleta durante 1 hora para establecer el equilibrio de absorción, la agitación se mantuvo constantes durante todo el experimento.

Capítulo 4: Resultados Y Discusión.

4.1. Técnicas De Caracterización De Los Polvos De CaTiO_3

4.1.1. Difracción De Rayos X De Los Polvos De CaTiO_3 .

La mayoría de los picos que presentó el difractograma corresponden al CaTiO_3 en fase perovskita con estructura ortorrómbica, en la Figura 6 se puede observar el difractograma de la muestra obtenida. Estos resultados coinciden con el PDF Card No. 00-089-69 con plano preferencial, además de la perovskita se presenta TiO_2 en fase rutilo con plano preferencial (110).

Una vez que se determinó la estructura, se obtuvo el contenido de material por el método de coeficientes de intensidad de referencia, por sus siglas en inglés RIR, el contenido presente de CaTiO_3 que de 74.7 % y de 25.3 % para el TiO_2 (10, 39).

La presencia de TiO_2 en fase rutilo se debe a que este se forma a altas temperaturas igual que el CaTiO_3 , por la temperatura de tratamientos empleadas se propicia a la formación de otros materiales, para evitar la formación de estas fases secundarias, se

emplean rampas de temperatura, estas se proponen para prevenir choques térmicos y evitar fracturas en el material y obtener muestras más homogéneas, un calentamiento o enfriamiento gradual permite que toda la pieza alcance la temperatura objetivo de manera uniforme, evitando zonas con distintas microestructuras y propiedades (10).

Otro factor muy importante es la elección de los precursores ya que estos influirán en la patrones de difracción de rayos X, en el caso del etanol este ayuda a disolver y dispersar los precursores de calcio y titanio, esto con la finalidad de que al momento de la evaporación del solvente se realice de manera uniforme logrando tener partículas más uniformes mismas que se reflejaran en unos picos más estrechos indicando buena cristalinidad, el nitrato de calcio aporta los iones de calcio a la reacción y la forma hidratada asegura una disolución completa y uniforme del sol además puede influir en la tasa de hidrólisis y condensación, afectando la formación del gel y, por ende, la estructura del material final, si se hace de manera correcta la integración del calcio durante el proceso sol-gel favorecerá la formación de una estructura cristalina uniforme de CaTiO_3 , lo que se reflejará en picos XRD bien definidos y característicos del perovskita CaTiO_3 . (30, 32, 35, 39). Una buena integración del calcio durante el proceso sol-gel favorecerá la formación de una estructura cristalina uniforme de CaTiO_3 , lo que se reflejará en picos XRD bien definidos y característicos del perovskita CaTiO_3 , la reactividad del butóxido de titanio puede ser controlada mediante la adición de etanol y agua. Esto permitirá la formación de una red homogénea, asegurando una estructura cristalina uniforme de CaTiO_3 (40-42).

Sin embargo, la presencia de la trazas de rutilo favorecen la formación de CaTiO_3 , esto sucede cuando se forma la fase rutilo impidiendo la aparición de otras fases, por ejemplo el TiO_2 presenta dos fases, anatasa y rutilo, esta última la más estable, comienza a formarse a temperaturas altas, alrededor de los $610\text{ }^\circ\text{C}$ a $800\text{ }^\circ\text{C}$, no obstante depende de factores variados como la velocidad de enfriamiento y la presión, la fase anatasa es una forma menos estable de TiO_2 esta se forma alrededor de los $350\text{ }^\circ\text{C}$ y $550\text{ }^\circ\text{C}$ (6,10, 39). La fase rutilo facilita la formación de CaTiO_3 debido a su estructura cristalina ya que presenta una red más abierta y una mayor reactividad superficial en comparación con la fase anatasa, como las temperaturas de formación de la fase rutilo son altas favorecen

la formación de CaTiO_3 , este se forma a temperaturas alrededor de $700\text{ }^\circ\text{C}$ y $900\text{ }^\circ\text{C}$, por el método sol-gel, estas temperaturas son suficientemente altas para activar la reacción entre el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de calcio (CaO) para producir el CaTiO_3 , además favorece las propiedades fotocatalíticas del material (43-45).

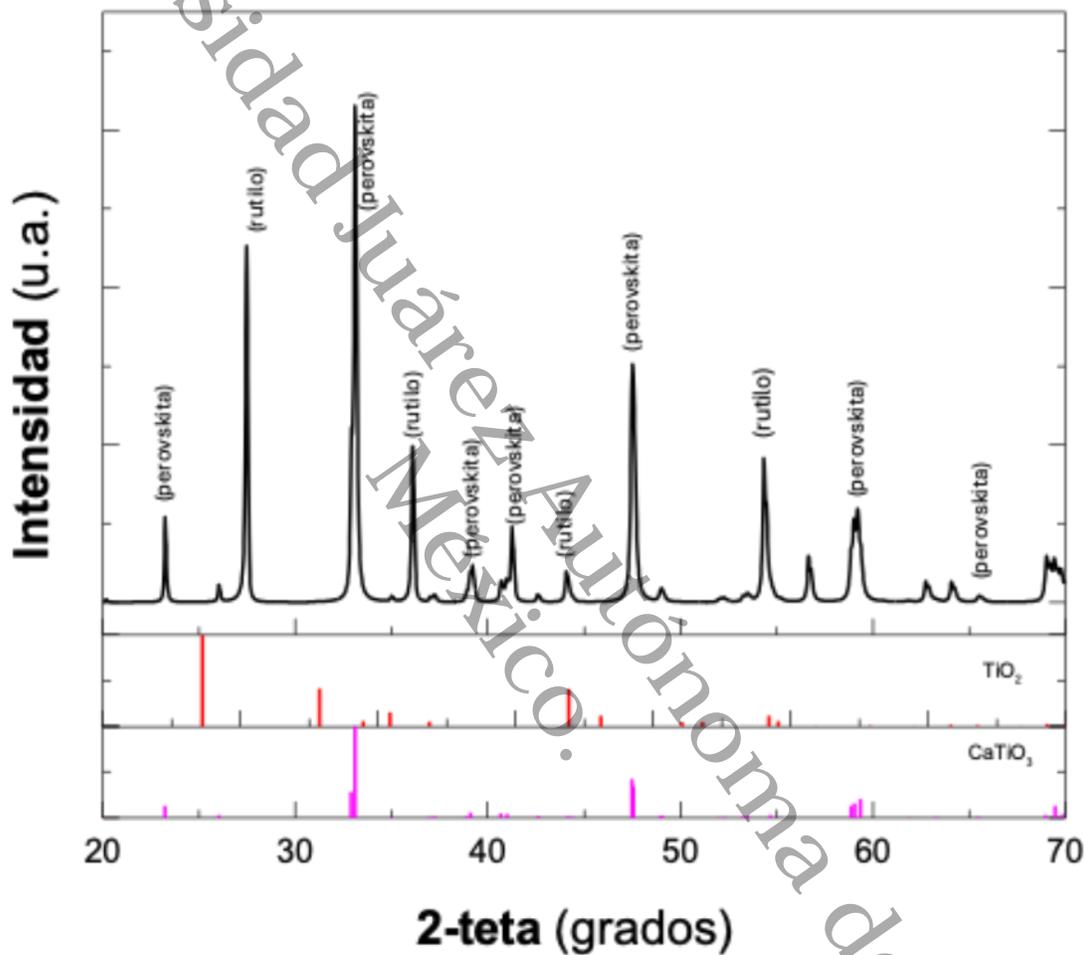


Figura 6: Difractograma de CaTiO_3 indicando los planos cristalinos.

4.1.2. Espectrofotometría UV-Vis De Los Polvos De CaTiO_3 .

El ancho de banda se determinó mediante la función Kubelka-Munk, esta función hace posible convertir los valores de reflectancia en valores de absorbancia, los valores fueron manejados como espectro de reflectancia difusa, para conocer el ancho de banda, el

valor que se obtuvo fue de 3.97 eV, este valor se puede observar la Figura 7, que corresponde al espectro de los polvos de CaTiO_3 .

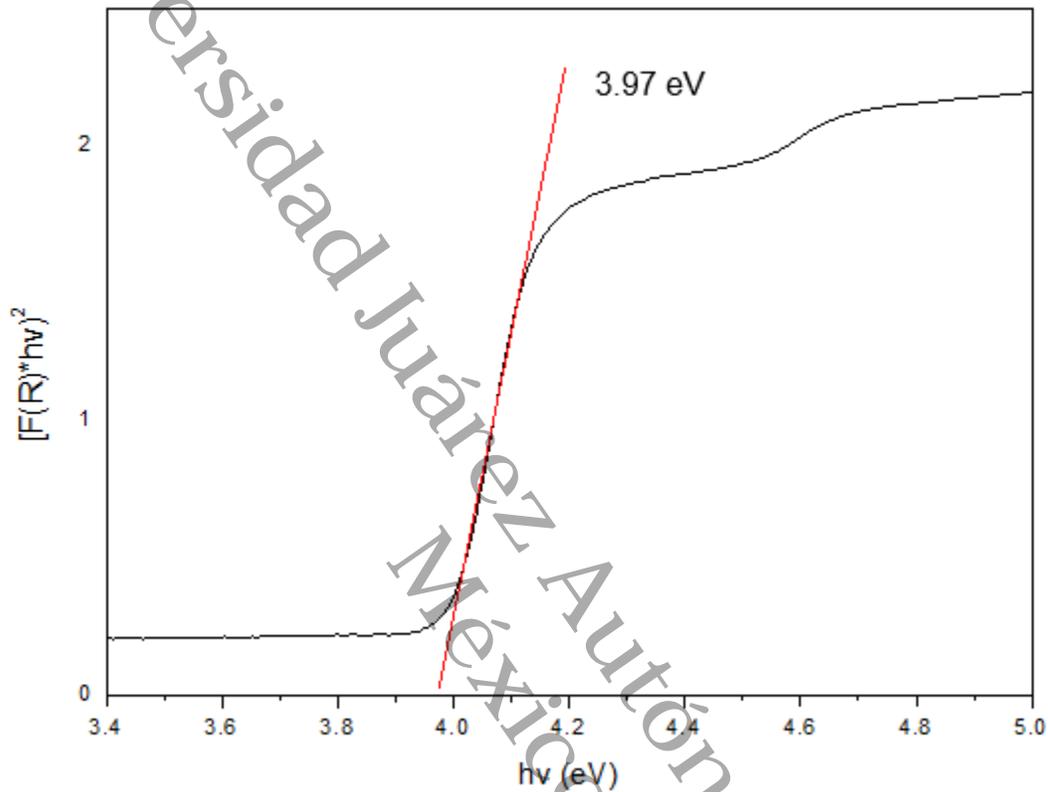


Figura 7: Espectro de reflectancia difusa de CaTiO_3 .

El valor de la banda prohibida de CaTiO_3 , reportado en 3.45 eV, puede variar significativamente debido a diversos factores relacionados con la síntesis y la estructura cristalina del material. Este aumento en el valor de la banda prohibida se atribuye principalmente a la estructura cristalina, la temperatura de reacción y los precursores químicos utilizados en la síntesis. Cabe mencionar que el método de síntesis del material también influye en el valor de la banda prohibida, así como su estructura (39, 40, 43). Un mayor orden en la estructura cristalina reduce los defectos, aumentando así el valor de la banda prohibida. La estructura cristalina varía con la temperatura de síntesis: a 1106 °C es ortorrómbica, entre 1106 °C y 1226 °C es tetragonal, y por encima de 1306 °C es cúbica. Síntesis y temperaturas óptimas (entre 700 °C y 900 °C mediante el método sol-

gel) produce un material más ordenado y una banda prohibida mayor. Además, partículas más pequeñas tienden a aumentar la banda prohibida debido a la reducción de defectos. El uso de ciertos precursores de titanio puede incrementar la capacidad fotoluminiscente del CaTiO_3 , mejorando sus propiedades dieléctricas, magnéticas, eléctricas y espectroscópicas. Entre los métodos químicos, el método de precursores poliméricos afecta el valor de la banda prohibida, que puede cambiar de 2.58 a 3.42 eV en el rango de temperaturas de 400 °C a 700 °C (35, 44, 46). De otra manera, la temperatura y el tiempo de tratamiento influyen significativamente en la banda prohibida y en el orden estructural del material (47, 48). La banda prohibida de CaTiO_3 está fuertemente influenciada por el método de síntesis, las condiciones de tratamiento térmico y los precursores utilizados, lo que permite ajustar las propiedades del material para aplicaciones específicas (41, 42).

La simetría juega un papel crucial en la determinación de la energía de la banda prohibida en semiconductores y materiales cristalinos (40, 43). En el titanato de calcio (CaTiO_3), su estructura cristalina también influye significativamente en su banda prohibida (35, 44). El material cristaliza en una estructura perovskita, caracterizada por una alta simetría. Esta conduce a una distribución uniforme de los átomos en la red cristalina, lo que resulta en una banda prohibida relativamente amplia y bien definida. La estabilidad de esta estructura minimiza la distorsión, facilitando la separación clara entre las bandas de valencia y conducción (46, 49, 50).

Por otro lado, en materiales con menor simetría cristalina, como algunos polímeros orgánicos, la banda prohibida tiende a ser más pequeña. Esto se debe a la mayor distorsión en la estructura cristalina, que permite a los electrones saltar más fácilmente entre las bandas de energía. En el titanato de calcio, la alta simetría y la estabilidad de su estructura cristalina reducen estas distorsiones, manteniendo una banda prohibida más grande y mejor definida (35, 40, 43, 44, 46, 49, 50).

Además, la simetría puede influir en la dispersión de los portadores de carga, como electrones y huecos, lo que a su vez puede afectar las propiedades eléctricas y ópticas del material (40, 43). Esta es relevante en la determinación de la estructura de bandas electrónicas y, por lo tanto, en el valor de la banda prohibida (35, 44, 46).

4.1.3. Morfología De Los Polvos De CaTiO_3 .

Los polvos de CaTiO_3 que se obtuvieron por el método sol-gel, se analizaron por la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), esta técnica utiliza un haz de electrones para formar una imagen en lugar de luz. La morfología de los polvos se muestra en las siguientes (Figura 8).

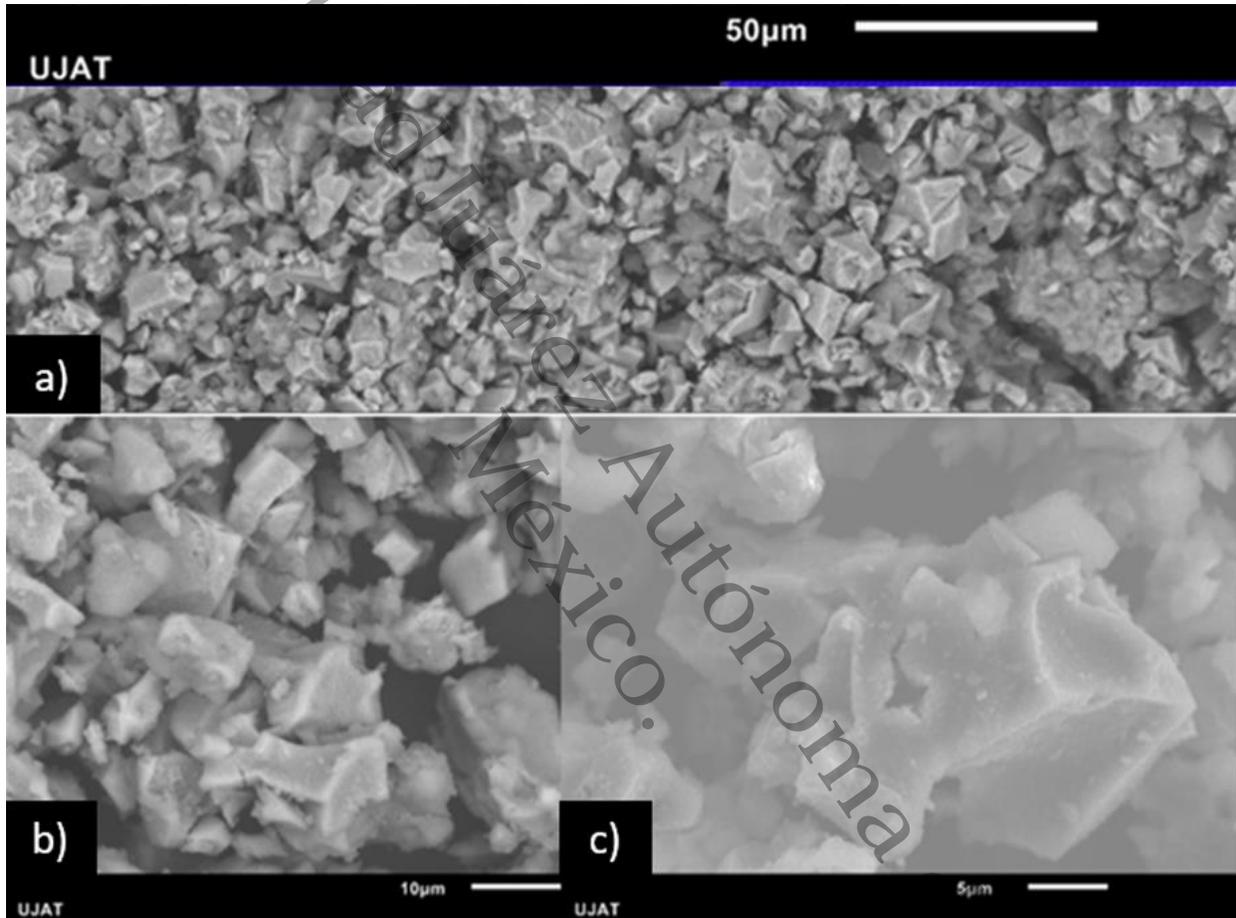


Figura 8: Morfología de polvos de CaTiO_3 , con magnificación de 8a) 500X, 8b) 2000X, 8c) 3000X.

Como se puede apreciar en las micrografías los polvos de CaTiO_3 exhiben una estructura no ordenada y policristalina. En la Figura 8c) (magnificación de 3000X), se observa la ausencia de un patrón geométrico discernible. Por otro lado, en la Figura 8a) (magnificación de 500X), este comportamiento se detalla con mayor claridad. No se identifican poros en la superficie del material; en su lugar, se presentan superficies

planas, como se evidencia en las figuras (Figura 8a y Figura 8b). Es perceptible que algunas partículas son de mayor tamaño que otras, lo que sugiere una distribución heterogénea en el material (51).

En este experimento se buscó disminuir el tiempo en la evaporación del solvente por lo que se necesitó modificar la temperatura de evaporación, como se mencionó previamente, los precursores utilizados influyen en la reacción y la forma final del material además de factores como la presión, la temperatura entre otros parámetros; comparando las diferentes metodologías de síntesis, los métodos en estado sólido proporcionan polvos más porosos, esto a altas temperaturas (6). En el caso de los métodos mecanoquímicos se tendrán un polvo con forma de microsferas y por el método sol-gel se obtiene una forma no ordenada y polidispersa, lo cual es consistente con la morfología del material sintetizado (10, 52).

4.2. Determinación De Degradación De Azul De Metileno.

4.2.1. Actividad Fotocatalítica.

Las pruebas de degradación se realizaron conforme al tiempo de radiación con la lámpara bajo las condiciones mencionadas en la parte experimental (40). En la gráfica que se muestra a continuación se puede observar (Figura 9), como la absorbancia decrece conforme avanza el tiempo durante la reacción, en la misma gráfica se puede observar que al término del experimento, que el IR del azul de metileno cae desde los 1.54 hasta valores por debajo de ir por debajo de 0.1.

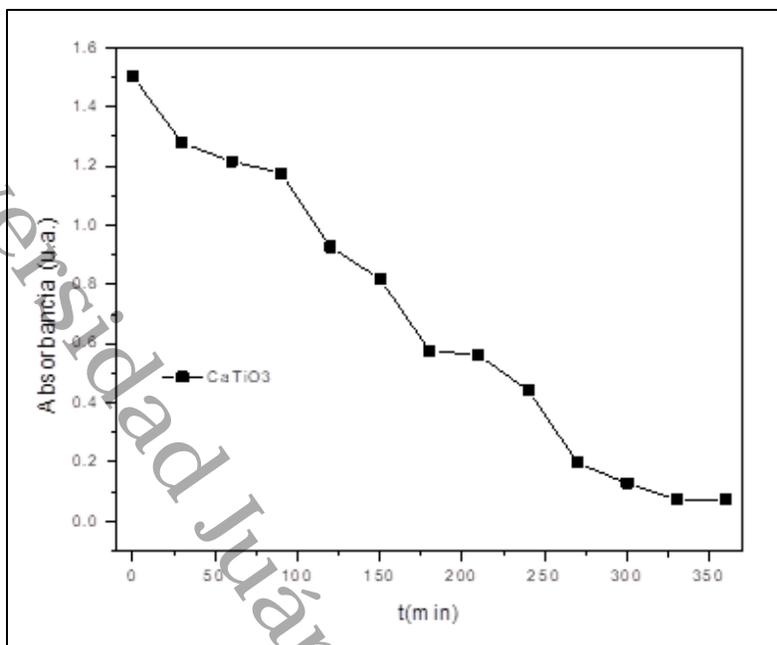


Figura 9: Absorbancia y tiempo de degradación de azul de metileno utilizando CaTiO_3 como catalizador.

El proceso de fotocatalisis se vio favorecido gracias a la energía de la lámpara ($\lambda = 254 \text{ nm}$), esto permite que los electrones involucrados en la reacción pasen de la banda de valencia a la banda de conducción, facilitando así la recombinación del catalizador al momento de crear el electrón-hueco, este proceso es necesario para que interaccionen las sustancias involucradas y el proceso sea dinámico (40, 53).

4.2.2. Constante De Reacción De La Degradación De Azul De Metileno.

La constante de reacción es un valor que nos indica hacia donde tiende la reacción, hay dos tipos de reacciones la reversibles e irreversibles, es decir a la formación de productos o reactivos y la segunda solo a la formación de productos, si nuestro valor de k se encuentra entre valores de 0.001 y 1000 tendremos una concentración significativa tanto de las especies de productos como de reactivos en el equilibrio, en la Figura 10 se puede observar la actividad fotocatalítica, estos datos se obtuvieron durante el experimento realizado (53, 54).

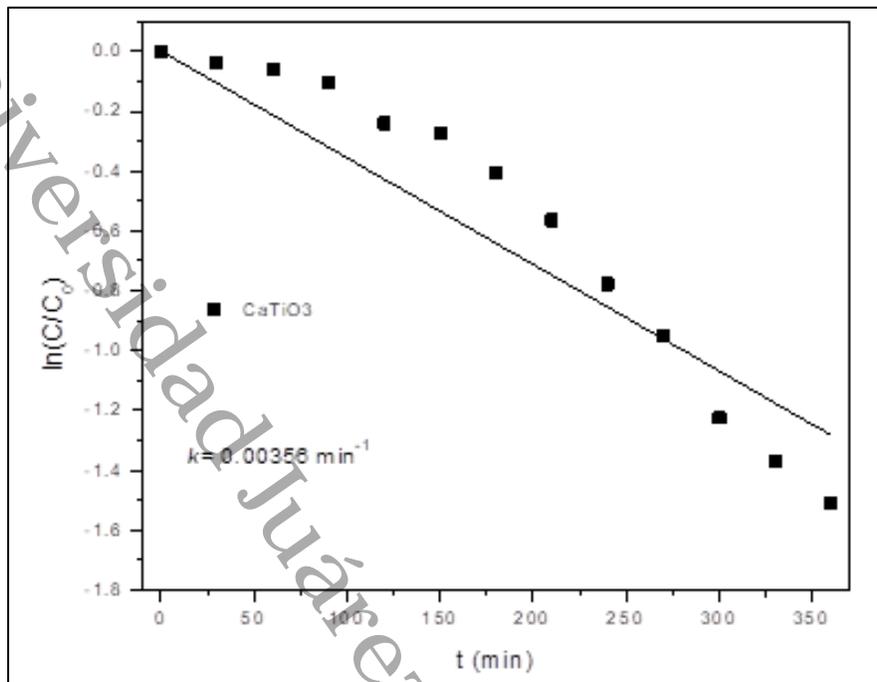


Figura 10: Actividad fotocatalítica de polvos de CaTiO_3 .

Se puede observar que durante las primeras horas del experimento hay una mayor actividad en la reacción y conforme avanza el tiempo esta disminuye, esto se debe a las trazas de TiO_2 que hay en los polvos ya que favorece la actividad, no obstante al tener una banda prohibida grande desfavorecía la capacidad de fotocatalisis de la perovskita (55, 56), sin embargo la presencia de trazas de TiO_2 favorece la actividad fotocatalítica lo que quiere decir que la degradación se llevó a cabo de manera rápida, esto se puede corroborar de acuerdo la constante de reacción (k) que es de 0.00356 min^{-1} indicando así una velocidad de reacción elevada, con una pendiente negativa podemos visualizar una disminución de la concentración con el tiempo, además se puede observar que la concentración final de azul de metileno muy pequeña en comparación a la inicial.

Como resultado se obtuvo que la Concentración final de azul de metileno tuvo una reducción de 72.2397 %.

Capítulo 5: Conclusiones.

El CaTiO_3 empleado como catalizador se sintetizó mediante el método sol-gel modificando parámetros de temperatura en la evaporación del solvente. Esta modificación fue eficiente, reduciendo los tiempos de evaporación 6 h a 2.5 h. Finalmente se obtuvo un polvo con una composición de 74.7 % CaTiO_3 y 25.3 % para el TiO_2 , esto nos indica un equilibrio en la reacción y una estabilidad en la composición de los polvos que sugiere que la relación de los componentes no depende significativamente del tiempo de evaporación en este rango de tiempo. Esto podría ser indicativo de un proceso controlado por la química de los materiales más que por el tiempo de evaporación. Resultando en una metodología adecuada para la obtención del CaTiO_3 que al tener fases secundarias presentes, permite su aplicación en áreas como la fotocatalisis.

El uso de CaTiO_3 como fotocatalizador bajo luz UV (254 nm, 11 W) demostró ser efectivo en la degradación del azul de metileno, con una reducción en la concentración inicial de 0.0267 mM hasta 0.007412 mM, lo que indica la efectividad del proceso de fotocatalisis, la pendiente de la gráfica negativa y la relación exponencial son consistentes con este tipo de cinética, donde la velocidad de la reacción es proporcional a la concentración del reactivo, este estudio demuestra el potencial del CaTiO_3 como fotocatalizador para la degradación de contaminantes orgánicos en agua bajo irradiación UV.

Otros estudios realizados reportan degradaciones de 97 % en comparación al 72. 2397 % reportado en el mismo tiempo, la diferencia radica en la pureza del material, ya que la mayor degradación se dio con un material 99.9 % de contenido de CaTiO_3 (10) comparado al 74.7 %, sin embargo, el tiempo de secado del solvente en el primer estudio es de 6 h en comparación a las 2.5 h que tarda en el segundo. Los resultados obtenidos pueden ser útiles para aplicaciones en tratamiento de aguas residuales y purificación del agua, especialmente en la eliminación de colorantes orgánicos.

5.1. Recomendaciones y perspectivas

Se recomiendan las siguientes acciones para posteriores investigaciones.

- Ajustar los parámetros de síntesis del material con la finalidad de mejorar las capacidades estructurales y de pureza.
- Experimentar la degradación fotocatalítica utilizando composites del titanato de calcio con otros óxidos semiconductores.
- Emplear otras técnicas de caracterización como microscopía electrónica de transmisión (TEM), espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) y microscopía de fuerza atómica (AFM) para tener información más detallada de las propiedades del material.
- Probar el material en la fotodegradación de otros contaminantes orgánicos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Bibliografía.

1. Sánchez, H. A. V., Pérez, D. C., & Yepes, M. A. (2013). Evaluación del TiO₂ soportado en vidrio PYREX para degradación fotocatalítica de compuestos orgánicos. *Scientia et Technica*, 18(3), 583-588. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84929154021>.
2. Rivera-Vázquez, R., Palacios-Vélez, Ó. L., Chávez Morales, J., Belmont, M. A., Nikolski-Gavrilov, I., De La Isla De Bauer, M., ... & Carrillo-Gonzalez, R. (2007). Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(2), 69-77. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992007000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
3. Mexicana, N. O. (1995). NOM-065-ECOL-1994. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las industrias de pigmentos y colorantes. *Diario Oficial de la Federación*, 1.
4. Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*, 12(2-3), 45-59. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93357608005>
5. Gomes De Moraes, S., Sanches Freire, R., & Durán, N. (2000). Degradation and toxicity reduction of textile effluent by combined photocatalytic and ozonation processes. *Chemosphere*, 40(4), 369–373. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00239-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00239-8)
6. Randhari, J., Senapati, S., Samal, B., & Mallik, P. K. (2022). Mechanochemical synthesis of CaTiO₃ powders: Microstructure and surface morphology. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1782–1785. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.08.017>
7. Flores Morales, C. R., Huari Huaman, O. P., & Perez Capcha, J. H. (2022). Remoción del azul de metileno de agua residual industrial textil mediante oxidación a nivel de laboratorio Huancayo, 2021.

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11353/1/IV_FIN_107_TE_Flores_Huari_Perez_2021.pdf

8. Sánchez, L. M. (2013). Síntesis rápida y aplicación fotocatalítica de prismas rectangulares de perovskita CaTiO_3 ; San Luis Potosí, S.L.P. México. INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.

9. Ramírez-Martín, C., Figueredo-Amaya, D., Mesa-Chaparro, J., & Rios-Rojas, A. M. (2020). Propiedades físicas de estructuras tipo perovskita: Síntesis y aplicaciones. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(S1), 307-314. <https://doi.org/10.15649/2346030X.2474>

10. García-Mendoza, M. F., Torres-Ricárdez, R., Ramírez-Morales, E., Álvarez-Ramírez, J. G., Díaz-Flores, L. L., del Ángel-Meraz, E., Rojas-Blanco, L., & Pérez-Hernández, G. (2023). CaTiO_3 perovskite synthesized by chemical route at low temperatures for application as a photocatalyst for the degradation of methylene blue. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(10), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S10854-023-10309-W/METRICS>

11. Garduño Urbina, C. (2019). Remoción del Colorante azul de Metileno empleando residuos de té verde. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/104539>

12. Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2), 52-73. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4333973>

13. Martínez, A. C., Olivares, C. C., Lozada, A. E., & Ramírez, C. G. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 2(3). <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/1862/5730>

14. Brañez Sánchez, M., & Uribe, C. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista Campus, ISSN-e 1812-6049, Vol. 23, N° 26, 2018 (Ejemplar Dedicado a: Campus XXVI), Págs. 129-144, 23(26), 129–144.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8625584&info=resumen&idioma=SPA>

15. Kolibri. (29 de mayo de 2023). Contaminantes de la industria textil en México. *El ECONOMISTA*, pág. 1.
16. Berneth, H. (2008). Azine Dyes. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. https://doi.org/10.1002/14356007.A03_213.PUB3
17. Oz, M., Lorke, D. E., Hasan, M., & Petroianu, G. A. (2011). Cellular and molecular actions of Methylene Blue in the nervous system. *Medicinal Research Reviews*, 31(1), 93–117. <https://doi.org/10.1002/MED.20177>
18. Váldez & Walter. (27 de 08 de 2023). *Concepto Definición*. Obtenido de Concepto Definición: https://conceptodefinition.de/azul-de-metileno/#google_vignette
19. Alejandro Arce Saldaña, L., Soto-Herrera, G., David Alejandro Domínguez Vargas Hugo Jesús Tiznado Vázquez Víctor Ruiz Cortes, M., Fuentes Moyado (2018). Coordinador. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 56 pp.
20. Garzón, F. S., & Pinzon., B. A. (2017). *Decoloración Y Degradación De azul De Metileno Presente En Agua*. Bogotá: Departamento de Ingeniería Ambiental. <https://hdl.handle.net/10901/11182>
21. La fotosíntesis artificial convierte el CO₂ en energía. (22 de 10 de 2023). Obtenido de La fotosíntesis artificial convierte el CO₂ en energía: https://www.japan.go.jp/tomodachi/_userdata/pdf/2020/earlysummer2020es/P26-27.pdf.
22. Marzo, L., Martinez-Haya, R., Marzo, L., & Martinez-Haya, R. (2018). Breve introducción a la fotocatalisis homogénea: modos de activación y aplicaciones sintéticas. *Anales de Química de La RSEQ*, 114(3), 141–148. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1099>
23. ICIQ virtual. (26 de 10 de 2023). *labvirtualIQ*. Obtenido de labvirtualIQ: <http://labvirtual.iciq.es/es/catalisis/?pdf=357>.

24. Izquierdo, M. F. (2016). Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía. *Grupo Español Carbón*, 3.
25. Universidad de Sonora.(s.f).Capítulo 2 Procesos radiativos en materiales: Universidad de Sonora. Obtenido de Universidad de Sonora: <http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23097/Capitulo2.pdf>
26. Wu, C. H., & Chang, C. L. (2006). Decolorization of Reactive Red 2 by advanced oxidation processes: Comparative studies of homogeneous and heterogeneous systems. *Journal of Hazardous Materials*, 128(2–3), 265–272. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.08.013>
27. Pavas, E. G., Tirado, K. M., & (GIPAB), U. EAFIT. G. de I. en P. A. y B. (2006). Aplicación de los sistemas fotocatalíticos para la destrucción de compuestos orgánicos y otras sustancias en fuentes hídricas. *Cuadernos de Investigación*, 49. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/view/1356>
28. Peternel, I. T., Koprivanac, N., Božić, A. M. L., & Kušić, H. M. (2007). Comparative study of UV/TiO₂, UV/ZnO and photo-Fenton processes for the organic reactive dye degradation in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 477–484. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.02.072>
29. Blanco, M. C., Fuertes, V. C., & Carbonio, R. E. (2018). *Hablemos de Perovskitas*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/51128>
30. Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. Academic Press. ISBN: 978-0121349701
31. Luisa, R. C. M. (2012). *Diseño y síntesis de materiales" a medida" mediante el método SOL-GEL*. Editorial UNED.
32. JH Bautista Ruiz, C. O. O., (2008). *El proceso Sol Gel*.<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/4440/1/3315.pdf>
33. Ramírez Palma, M., Teresa, M., Acuña, H., Acosta, E., Padrón, H., & Ergo, C. (2010). *Estado del arte del proceso sol-gel en México*. 17(2), 183–188. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10413200009>

34. Alvarado Flores, J. J. (2017). Análisis de la estructura perovskita $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_y\text{Mn}_{1-y}\text{O}_{3-\delta}$ con potencial aplicación como ánodo para celdas de combustible de óxido sólido. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56(2), 73–82. <https://doi.org/10.1016/J.BSECV.2016.09.003>
35. Cavalcante, L. S., Marques, V. S., Sczancoski, J. C., Escote, M. T., Joya, M. R., Varela, J. A., Santos, M. R. M. C., Pizani, P. S., & Longo, E. (2008). Synthesis, structural refinement and optical behavior of CaTiO_3 powders: A comparative study of processing in different furnaces. *Chemical Engineering Journal*, 143(1–3), 299–307. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2008.05.017>
36. Viasus, J. D. (2016). *Producción y Caracterización del Sistema $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ (Con $x = 0.25, 0.5, 0.75$)* [tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. AFG. Trabajos de Grado y Tesis. Obtenido de <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2481>.
37. Aparicio Ceja, M. E., Carbajal Arizaga, G. G., Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2008). Mundo nano : revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 3(2), 62–72. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912010000200062&lng=es&nrm=iso&tlng=es
38. Díaz, N. A., Ruiz, J. A., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P. Fiñana., I. T. (s.f.). Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Campus Universitario de Rabanales., Córdoba. Obtenido de: https://www.uco.es/dptos/bioquimicabiolmol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
39. Hinojosa, J. J., Trujillo Navarrete, B., Félix Navarro, R. M., Paraguay Delgado, F., Rodríguez Barrera, J. R., Ochoa Terán, A., Hinojosa, J. J., Trujillo Navarrete, B., Félix Navarro, R. M., Paraguay Delgado, F., Rodríguez Barrera, J. R., & Ochoa Terán, A. (2024). Síntesis y caracterización de titanato de calcio (CaTiO_3) como potencial sensor electroquímico de contaminantes orgánicos en solución acuosa. *Revista De Ciencias Tecnológicas*, 7(1), e312. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n1e312>

40. Acosta, A. Z. (2023). Obtención y caracterización de mezclas de polvos de Bi_2O_3 y TiO_2 para aplicaciones fotocatalíticas.
41. Hench, L. L., & West, J. K. (1990). The Sol-Gel Process. *Chemical Reviews*, 90(1), 33–72. https://doi.org/10.1021/CR00099A003/ASSET/CR00099A003.FP.PNG_V03
42. Ajaja, O. (1991). Role of recovery in high temperature constant strain rate deformation. *Journal of Materials Science* 1991 26:24, 26(24), 6599–6605. <https://doi.org/10.1007/BF00553683>
43. Mazzo, T. M., Do Nascimento Libanori, G. S., Moreira, M. L., Avansi, W., Mastelaro, V. R., Varela, J. A., & Longo, E. (2015). Influence of titanium precursor on photoluminescent emission of micro-cube-shaped CaTiO_3 . *Journal of Luminescence*, 165, 130–137. <https://doi.org/10.1016/J.JLUMIN.2015.03.028>
44. Biegalski, M. D., Qiao, L., Gu, Y., Mehta, A., He, Q., Takamura, Y., Borisevich, A., & Chen, L. Q. (2015). Impact of Symmetry on the Ferroelectric Properties of CaTiO_3 Thin Films. *Applied Physics Letters*, 106(16). <https://doi.org/10.1063/1.4918805>
45. Cesconeto, F. R., Borlaf, M., Nieto, M. I., de Oliveira, A. P. N., & Moreno, R. (2018). Synthesis of CaTiO_3 and $\text{CaTiO}_3/\text{TiO}_2$ nanoparticulate compounds through $\text{Ca}^{2+}/\text{TiO}_2$ colloidal sols: Structural and photocatalytic characterization. *Ceramics International*, 44(1), 301–309. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.09.173>
46. Ashcroft, N.W. and Mermin, N.D. (1976) Solid State Physics. Saunders College, Philadelphia, 116, 217.
47. Cortés-Vega, F. D., Montero-Tavera, C., & Yañez-Limón, J. M. (2020). Influence of diluted Fe^{3+} doping on the physical properties of BaTiO_3 . *Journal of Alloys and Compounds*, 847, 156513. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.156513>
48. Medina Sierra, J. (2014). Efecto del dopaje con elementos lantánidos sobre las propiedades ópticas, estructurales y fotocatalíticas de TiO_2 .

49. Rabe, K. M., Ahn, C., Triscone, J.-M., Rabe, K. M., Ahn, C., & Triscone, J.-M. (2007). Physics of ferroelectrics : a modern perspective. *Springer*, 105(2007), 1. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:12885>
50. Peter, Y. U., & Cardona, M. (2010). Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties. *4th Edition*. Springer Science & Business Media.
51. Flores-Ramírez, J. A., Morales-Anzures, F., Salinas-Hernández, P., Castro-Arellano, J. J., Mejía-García, C., & Chávez-Rivas, F. Síntesis y caracterización por XRD y SEM-HR de nanocatalizadores de Cu/ZrO₂. From <https://www.esfm.ipn.mx/assets/files/esfm/docs/RNAFM/articulos2020/XXVRNAFM070.pdf>
52. Gralik, G., Thomsen, A. E., Moraes, C. A., Raupp-Pereira, F., & Hotza, D. (2014). Processing and characterization of CaTiO₃ perovskite ceramics. *Processing and Application of Ceramics*, 8(2), 53-57. <https://doi.org/10.2298/PAC1402053G>
53. Niu, B., Wang, X., Wu, K., He, X., & Zhang, R. (2018). Mesoporous Titanium Dioxide: Synthesis and Applications in Photocatalysis, Energy and Biology. *Materials 2018, Vol. 11, Page 1910*, 11(10), 1910. <https://doi.org/10.3390/MA11101910>
54. Khan, S. (14 de Marzo de 2024). *Khan Academy*. Obtenido de Khan Academy: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/chemical-equilibrium-ap/equilibrium-constant-ap/a/the-equilibrium-constant-k>
55. Chen, M., Xiong, Q., Liu, Z., Qiu, K., & Xiao, X. (2020). Synthesis and photocatalytic activity of Na⁺ co-doped CaTiO₃:Eu³⁺ photocatalysts for methylene blue degradation. *Ceramics International*, 46(8), 12111–12119. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.01.256>
56. Huang, X. J., Yan, X., Wu, H. Y., Fang, Y., Min, Y. H., Li, W. S., Wang, S. Y., & Wu, Z. J. (2016). Preparation of Zr-doped CaTiO₃ with enhanced charge separation efficiency and photocatalytic activity. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(2), 464–471. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64097-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64097-9)

Anexos

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Titanato de calcio (CaTiO_3) como catalizador en la degradación fotocatalítica de azul de metileno.
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Aguirre Aquino Lorenzo Enrique
ORCID	https://orcid.org/0009-0001-2146-7107
Resumen de la Tesis:	<p>En este estudio, se investigó la degradación del colorante azul de metileno, ampliamente utilizado en la industria textil como tinte, así como en productos químicos, detergentes y alimentos, mediante fotocatalisis heterogénea. El proceso de descomposición del colorante se llevó a cabo utilizando una fuente de luz ultravioleta en una cámara oscura, empleando titanato de calcio (CaTiO_3) como catalizador. La concentración del colorante en la solución fue de 0.0267 mM.</p> <p>La síntesis del catalizador tipo perovskita (CaTiO_3) se realizó mediante el método sol-gel, seleccionado por su capacidad de mejorar las propiedades ópticas del material en comparación con otros métodos de síntesis. Se optimizó el proceso al incrementar la temperatura de evaporación del gel, lo que permitió reducir el tiempo de obtención del polvo. La caracterización de la muestra obtenida se llevó a cabo mediante difracción de rayos X, utilizando un equipo D8 ADVANCE BRUKER.</p> <p>Los resultados de las muestras recolectadas durante el proceso de degradación fueron analizados mediante espectroscopía UV-Vis, empleando un espectrofotómetro Agilent modelo 8453. Los datos obtenidos se compararon con estudios previos,</p>

	evidenciando la efectividad del proceso bajo las condiciones experimentales descritas.
Palabras claves de la Tesis:	Fotocatálisis, perovskita, Titanato de calcio, rayos X, UV Vis.
Referencias citadas:	

Cálculos

Concentración de azul de metileno

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -k$$

$$\ln\left(\frac{C_t}{0.0267 \text{ mM}}\right) = -0.00356 \text{ min}^{-1} * 360 \text{ min}$$

$$\ln\left(\frac{C_t}{0.0267 \text{ mM}}\right) = -1.281600$$

$$\frac{C_t}{0.0267 \text{ mM}} = e^{-1.281600}$$

$$C_t = 0.0267 \text{ mM} * e^{-1.281600}$$

$$C_t = 0.0267 \text{ mM} * 0.277593$$

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

TITANATO DE CALCIO (CATIO3) COMO CATALIZADOR EN LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO.

Por LORENZO ENRIQUE AGUIRRE AQUINO

CANTIDAD DE PALABRAS 12139

HORA DE ENTREGA

19-SEPT-2024 11:07P. M.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO

111823491

TITANATO DE CALCIO (CATIO3) COMO CATALIZADOR EN LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO.

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	revistas.udes.edu.co Internet	424 palabras — 4%
2	www.coursehero.com Internet	114 palabras — 1%
3	eprints.uanl.mx Internet	75 palabras — 1%
4	www.slideshare.net Internet	67 palabras — 1%
5	digital.csic.es Internet	58 palabras — 1%
6	tesis.ipn.mx Internet	58 palabras — 1%
7	docplayer.es Internet	56 palabras — 1%
8	repositorio.umsa.bo Internet	56 palabras — 1%
9	hdl.handle.net Internet	53 palabras — 1%



COORDINACION
DE ESTUDIOS
TERMINALES