



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

De la Tela al Agua: Degradación Fotoquímica en Colorante
Azul

Proyecto de Investigación para obtener el título de

Ingeniera Ambiental

Especialidad:
Sustentabilidad y tecnologías del agua

Presenta:
Fernanda Alejandra García Hurtado

Asesor:
Pilar Concepción Jasso Jiménez

Febrero 2025

AGRADECIMIENTOS

En el camino del conocimiento, como decía Kant, “ Tuve que limitar el conocimiento para hacer espacio a la fe”. Este proyecto no solo representa el resultado de mi aprendizaje, sino también una manifestación de fe: fe en mí misma, en quienes me rodean, y en el poder transformador de la educación; Reflexionar sobre este recorrido me lleva a valorar profundamente el acto de pensar, de cuestionar y de existir, porque en cada pensamiento encontré las fuerzas para avanzar.

Quiero dedicar este logro a las dos personas más importantes en mi vida, “mis padres”, a ustedes les debo el regalo más grande, el de la vida misma.

Gracias por haber estado conmigo en cada paso de este camino, por las desveladas compartidas, los regaños que fortalecieron mi carácter, la disciplina que moldeó mi determinación y el amor infinito que me inspira a proyectar lo mejor de mí hacia los demás. Su apoyo ha sido mi pilar, su confianza, mi motor, y su ejemplo, mi guía.

Agradezco también a todas las personas que creyeron en mí, que con sus palabras de aliento me impulsaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Su fe en mí y su compañía me recordaron que el conocimiento no solo se construye en soledad, sino en comunidad.

Gracias por estar conmigo en este viaje de reflexión y existencia. Este logro es tanto mío como de ustedes.

RESUMEN

El detonante de esta investigación radica en la problemática ambiental generada por la liberación de colorantes sintéticos en específico, Azul índigo, en las aguas residuales de la industria textil. Este colorante, caracterizado por su intensa tonalidad y resistencia a la degradación, representa un desafío significativo para los sistemas convencionales de tratamiento de agua debido a su composición química compleja y su persistencia en el medio ambiente.

Frente a los elevados costos y subproductos indeseados de los tratamientos de aguas residuales tradicionales surge la urgencia de hallar opciones más eficientes y ecológicas. La fotocatalisis especialmente con el uso de óxido de zinc (ZnO), se revela como una solución avanzada. Este semiconductor, notable por su gran banda de energía, facilita la degradación de contaminantes complejos como el Azul índigo bajo luz ultravioleta. Comparativamente, el ZnO se posiciona como un material fotocatalítico superior, según la literatura, promoviendo un tratamiento de aguas más efectivo y sustentable.

Diversos estudios, como los realizados por Liu. Et al. (2024) , han corroborado la eficiencia del ZnO en la fotocatalisis, demostrando su capacidad para reducir significativamente la concentración del Azul índigo en aguas residuales textiles. La efectividad no solo radica en su capacidad para degradar los contaminantes, sino también en su potencial para minimizar la formación de subproductos tóxicos, lo que lo convierte en una opción viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil. (Liu, J., Wang, H., Wu, H., Yang, Y., Wang, C., Wang, Q., Jia, B., & Zheng, J., 2024, *Journal of Materials Chemistry A, Materials for Energy and Sustainability*)

ÍNDICE

Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Generalidades Del Proyecto.....	6
Introducción.....	7
Justificación	11
Problemática A Resolver Necesidad O Requerimiento Del Mercado	17
Antecedentes.....	19
Objetivos.....	26
Alcances Y Limitaciones	28
Potencial Y Factibilidad De Los Alcances Previstos	30
Marco Teórico	32
Desarrollo	40
Resultados.....	54
Conclusiones... ..	58
Competencias Desarrolladas	61
Bibliografía.....	63
Anexos	66

GENERALIDADES DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

La historia de la Industria Textil en América Latina es intrínsecamente rica y se entrelaza con el desarrollo de la región. Desde tiempos prehispánicos, especialmente en las regiones de los Andes y Mesoamérica, la producción de textiles ha sido una actividad central, continuando su importancia a lo largo de la época colonial y desempeñando un papel esencial en el desarrollo económico y cultural de la región. Como señala Claudio Bellini en su artículo “La industria textil en América Latina” (junio de 2009), el surgimiento de los obrajes coloniales, las variaciones regionales en este desarrollo, los vínculos con el capital comercial y su influencia en la conformación de los mercados coloniales capturaron la atención de los latinoamericanos. Este sector no solo fue testigo de las complejidades de la economía colonial, sino que también contribuyó al desarrollo del capitalismo. Con el avance hacia los siglos XIX y XX, la importancia de la industria textil no solo se mantuvo, sino que se consolidó aún más.

Más allá de su significativa contribución económica, es crucial reconocer el impacto ambiental de la industria textil. En este contexto, un estudio conjunto realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Cámara Nacional de la Industria Textil (CANAINTEX) ha arrojado luz sobre la relevancia de esta industria en México. Se ha descubierto que en diez estados de la República Mexicana se concentra el 85.7% de la producción nacional de la industria textil, sobresaliendo en estados como el Estado de México, Puebla e Hidalgo. En 2019, la diversidad de productos de la industria textil incluía telas de mezcla de fibras blandas, telas no tejidas comprimidas para uso industrial, y telas recubiertas plásticas con soporte textil, entre otros, que juntos sumaron el 33.6% de la producción total del sector. Estos datos

reflejan la compleja relación entre la industria textil y su entorno, abordando tanto sus desafíos como las posibles soluciones sostenibles (Colección de estudios sectoriales y regionales Conociendo la Industria textil y de la confección, 2020).



Ilustración 1: Autor Ana G. Frutos, Etapas en el ciclo de vida de un producto textil.

Simultáneamente, la industria química ha avanzado significativamente en el desarrollo de colorantes sintéticos, ofreciendo una extensa gama de tonalidades. Estos colorantes, identificados por nombres comerciales y códigos numéricos en índices de colores, deben cumplir con requisitos esenciales como la capacidad de adherirse a la fibra textil, resistencia al lavado y a la exposición solar, y cumplir con estándares sanitarios. La capacidad de un colorante para resistir el lavado y la abrasión es crucial, asegurando así que la coloración permanezca intacta a lo largo de la vida útil de la prenda. Esta necesidad varía según el uso previsto del textil.

Para concluir esta introducción, es esencial destacar una perspectiva más amplia que abarque tanto la economía como el medio ambiente. Según un análisis de United Nations and Environment (2018), conocido como los informes de Comercio y Desarrollo de la ONU, la industria minorista de moda

se identifica como un sector de gran relevancia económica. Este reconocimiento no se debe solo a su impacto económico, sino también a su considerable influencia en el medio ambiente. Sorprendentemente, en 2019, esta industria fue clasificada como la segunda más contaminante a nivel mundial, una distinción que resalta su enorme demanda de recursos naturales, en especial de agua y materias primas. Un ejemplo ilustrativo de este impacto es la producción de una simple camiseta, que requiere aproximadamente 2,700 litros de agua, cifra que ni siquiera incluye el consumo de agua a lo largo de su ciclo de vida.

Esta información no solo es reveladora, sino también crucial para el enfoque de este proyecto de investigación. Comprender la magnitud del impacto ambiental de la industria textil, y en particular, cómo nuestras decisiones de consumo afectan al medio ambiente, es fundamental. Estos datos no solo proporcionan una visión clara y concisa de los retos a los que nos enfrentamos, sino que también subrayan la importancia de explorar en profundidad los problemas y soluciones potenciales que se abordarán en este proyecto. Por tanto, este análisis establece el escenario para una investigación que busca no solo entender, sino también actuar frente a los desafíos ambientales que plantea la industria textil en el mundo actual.

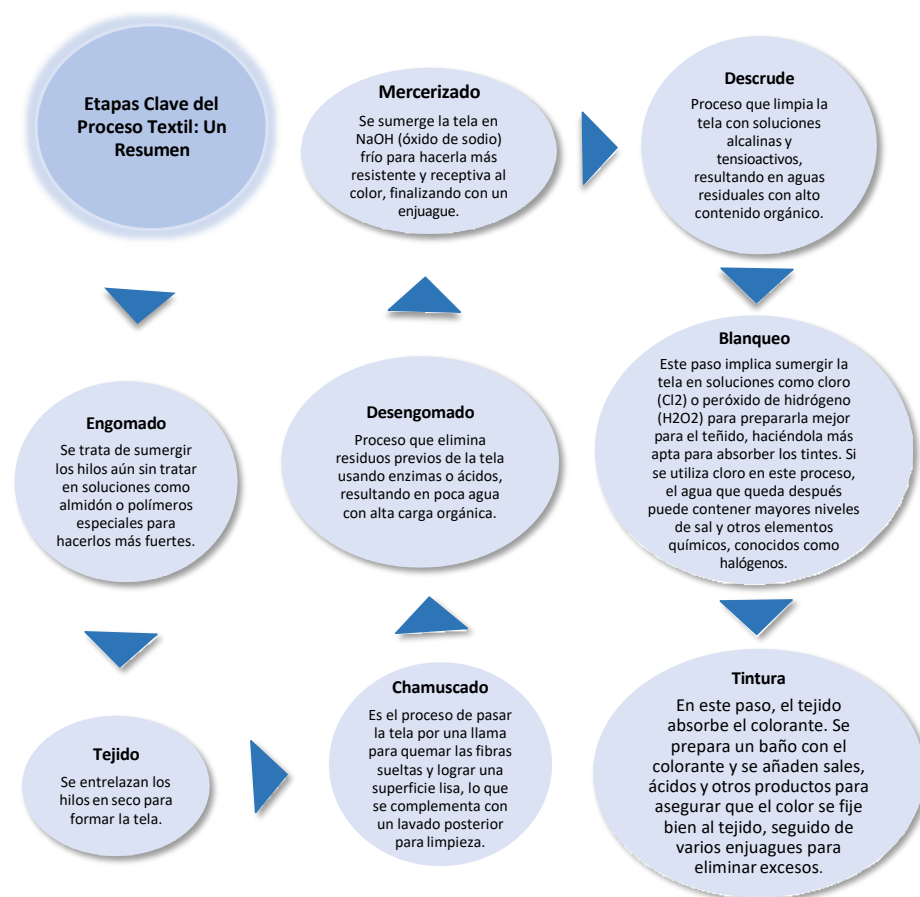
JUSTIFICACIÓN

La industria textil moderna enfrenta un grave desafío ambiental y de salud pública, exacerbado por un fenómeno de consumo desmedido. Desde la década de los noventa, la adquisición de ropa ha aumentado cuatro veces, y cada ciudadano mexicano desecha alrededor de siete kilos de productos textiles al año. La prevalencia de la “moda rápida” ha impulsado una producción masiva y ha reducido la vida útil de las prendas, generando un incremento significativo en la industria textil a nivel global, especialmente en Asia, el Sudeste Asiático, América Central y Sudamérica, incluido México (Patricio López Alcelay, “Contaminación en la industria textil”). A pesar de los beneficios económicos y laborales especialmente para las mujeres, este crecimiento ha creado una brecha social y ambiental notable.

En el ámbito de la industria textil, como el Azul índigo, son compuestos químicos sintéticos con estructuras aromáticas que desempeñan un papel esencial en la producción de una amplia gama de productos. Sin embargo, su naturaleza recalcitrante a la biodegradación, debido a su origen xenobiótico, presenta un desafío ambiental significativo. La toxicidad de estos colorantes para la flora y fauna acuática, especialmente por su capacidad para reducir la penetración de la luz y obstruir el proceso de fotosíntesis en sistemas acuáticos, es una preocupación creciente.

El proyecto titulado “De la Tela al Agua: Degradación Fotoquímica del Colorante Azul índigo Usando Óxido de Zinc (ZnO) como Fotocatalizador” se centra en abordar estos desafíos mediante el uso de procesos avanzados de degradación fotoquímica. La propuesta utiliza óxido de zin como fotocatalizador, explorando su eficiencia en la degradación del colorante azul índigo bajo condiciones específicas de irradiación lumínica. Este enfoque no solo busca eliminar el contaminante de los efluentes industriales, sino también

contribuir a la reducción del impacto ambiental de la industria textil, promoviendo así la sostenibilidad en los procesos de tratamiento de aguas residuales.



Además, los efluentes textiles, que contienen materia coloidal, colores y grasas, contribuyen a la turbidez del agua, afectando negativamente tanto el proceso de fotosíntesis como la transferencia de oxígeno en la interfaz aire-agua. La consecuencia más grave de estos residuos es la disminución del oxígeno disuelto en el agua, un elemento vital para la vida marina y el proceso

de auto purificación del agua. El riesgo asociado con estos desechos incluye un aumento en el contenido de carbono orgánico en el suelo, lo que eleva las preocupaciones sobre su posible ingreso en la cadena alimentaria, los riesgos para la salud humana y ambiental. Esta problemática ha sido destacada en los estudios realizados por el Dr. Víctor López Grimaú y el Dr. Martín Crespi Rosell en 2015."

Los metales pesados provenientes de estos desechos, como se observa en las investigaciones de Bertoldi et al. (2012) y Zhang et al. (2010), pueden contaminar el suelo y las aguas subterráneas. Además, el análisis toxicológico de las especies animales, como ratones y ratas, utilizado para evaluar la toxicidad de las aguas residuales industriales, revela parámetros sanguíneos importantes como indicadores de toxicidad (Sancho et al., 2000; Barcellos et al., 2013).

Los parámetros como el pH alcalino (entre 9 y 11), el color visible (1,100 a 4,500 unidades) y los sólidos totales (6,000 a 7,000 mg/L) demuestran la complejidad de los efluentes y la variabilidad de las sustancias químicas empleadas durante el proceso textil. Estos datos, extraídos del documento de Patricio López Alcelay, "Contaminación en la industria textil", subrayan la urgencia de abordar esta problemática desde una perspectiva ambiental y de salud pública.

La investigación llevada a cabo en colaboración con la Universidad de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Autónoma Metropolitana ha demostrado que los efluentes de la industria textil no solo incumplen con los parámetros indicados por la NOM 002 ECOL 1996, sino que también presentan una alta conductividad eléctrica, lo que agrava el problema. La problemática se extiende a las micro y pequeñas

lavanderías especializadas en el acabado de pantalones de mezclilla en Antepetitla de Lardizabal, Tlaxcala, como se detalla en un estudio publicado en la revista *Mexicana de Ingeniería Química*.

Además, los cromóforos comunes en los colorantes textiles como los azos, carbonilos, metilos, nitros y quinoides, ofrecen una amplia gama de tonalidades, se clasifican según su aplicación en reactivos, directos y dispersos. Estos colorantes no solo poseen una notable resistencia a la exposición solar, productos químicos y descomposición microbiana, sino que los efluentes contienen metales peligrosos como Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobalto, Cobre, Manganeseo, Mercurio, Níquel, Plata, Titanio, Zinc, Estaño y Plomo, surgiendo principalmente durante el proceso de teñido. Estos metales, y en particular el cobre, representan una amenaza significativa para la calidad del suelo y los cultivos.

Actualmente, la mayoría de los tintes utilizados son sintéticos, derivados principalmente del alquitrán y productos intermedios a base de petróleo, comercializados en diversas formas como polvos, gránulos, pastas o dispersiones líquidas. La constante evolución de estos tintes, impulsada por la demanda de nuevas tecnologías, tejidos, detergentes, avances en maquinaria de teñido y, crucialmente, por la necesidad de abordar preocupaciones medioambientales, subraya la importancia de esta investigación. (Samchetshabam Gita Ajmal Hussan, 2017)

Los efluentes textiles comprenden alrededor del 40% de los colorantes utilizados a nivel mundial. La presencia de materiales orgánicos en las aguas residuales textiles es una preocupación relevante en el tratamiento del agua. Estas sustancias pueden reaccionar con desinfectantes como el cloro y

evaporarse, causando reacciones alérgicas y daños en la salud (*Textil dyeing industry and environmental hazard, 2012*).

El 70% de los desechos industriales terminan como efluentes textiles, y el 20% de estos tóxicos se vierten en ríos y océanos. Los parámetros fundamentales para caracterizar las aguas residuales de la industria textil incluyen la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y el Carbono Orgánico Total (TOC). Estos parámetros son cruciales para comprender y monitorizar el impacto ambiental de los efluentes textiles.

**PROBLEMÁTICA A RESOLVER, NECESIDAD O
REQUERIMIENTO DEL MERCADO**

El agua, un recurso vital para la humanidad, enfrenta desafíos crecientes debido a la contaminación generada por actividades humanas, el crecimiento demográfico y el uso inadecuado de este recurso esencial. A menudo, el retorno del agua a los cauces naturales lleva consigo un nivel de contaminación que deteriora su calidad, convirtiendo la mitigación de esta contaminación en una prioridad urgente.

Bajo los lineamientos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente, se establecen criterios fundamentales para la prevención y control de la contaminación del agua. Esto hace vital el tratamiento previo de las aguas residuales antes de su descarga en cuerpos de agua, con el fin de preservar la disponibilidad del recurso y proteger los ecosistemas. Además, la participación activa de la sociedad es crucial para combatir la contaminación hídrica.

En este contexto, la investigación se enfoca en la creciente demanda de soluciones eficientes para el tratamiento de aguas contaminadas. El objetivo principal es desarrollar un método que utilice un fotocatalizador de bajo costo en este caso el óxido de zinc (ZnO) para la degradación de colorantes que simulan soluciones de agua contaminada tratada con radiación UV. Este enfoque busca no solo reducir el impacto ambiental sino también ofrecer un proceso viable y eficaz que permita la reducción del color y los compuestos orgánicos presentes en el agua. Este método debe adaptarse a diversas concentraciones de colorantes y mantener resultados consistentes.

ANTECEDENTES

La industria textil se ha identificado como una fuente significativa de contaminación hídrica, principalmente debido al uso de colorantes que presentan un grave riesgo para la salud humana. Estos colorantes, entre los que se incluyen el Azul Índigo, la Tartrazina y el Oxalato Verde de Malaquita, han sido clasificados no solo como tóxicos, sino también como agentes cancerígenos y mutagénicos (Lou et al., 2018; Sriram et al., 2019). En particular, el Azul Índigo, un colorante catiónico de base aromática, ha sido asociado con una serie de efectos adversos para la salud como la metahemoglobinemia, anemia, hipertensión, y daño neurológico, entre otros (Imron et al., 2019; L. Chen et al., 2021; Sahu et al., 2020).

La relevancia de este proyecto se fundamenta en el reconocimiento de dichos materiales semiconductores ya mencionados, que han sido reportados como fotocatalizadores eficaces en la descomposición de contaminantes.

El interés principal de esta investigación radica en la síntesis y preparación a gran escala de nanomateriales de óxidos metálicos, enfocándose particularmente en el óxido de zinc (ZnO). Este semiconductor se destaca por su intervalo de banda energética prohibida de 3.37 eV (Electrovoltio), siendo considerado uno de los mejores fotocatalizadores para la purificación de agua residual de origen textil. Esta característica lo posiciona como un candidato ideal para abordar los desafíos ambientales presentes en la degradación de contaminantes acuáticos.

Además, estudios como los de Kang et al. han demostrado que el tratamiento térmico puede potenciar las reacciones fotocatalíticas, incrementando la eficacia de estos procesos mediante la mejora en el área de la superficie y la eliminación de impurezas. Este hallazgo es especialmente relevante para

Comentado [IZ2]: eV

nuestro enfoque, ya que sugiere la posibilidad de optimizar aún más la efectividad de los fotocatalizadores compuestos por ZnO.

En resumen, la justificación de este proyecto se asienta en la combinación de la necesidad imperiosa de abordar la contaminación por colorantes orgánicos en el agua y la promesa mostrada por los semiconductores como el ZnO en la fotocatálisis. La investigación propuesta no solo busca aportar una solución viable y sustentable a un problema ambiental crítico, sino también contribuir al avance del conocimiento en la síntesis y aplicación de nanomateriales fotocatalíticos. *(Síntesis de nanopartículas de ZnO para la degradación de contaminantes en agua por medio de fotocatálisis, 2021)*

El impacto ambiental de estos colorantes se ve agravado por su naturaleza no biodegradable, lo que complica su eliminación y tratamiento *(Uthappa et al., 2020)*. Actualmente, los métodos existentes para tratar aguas contaminadas con colorantes, tales como la ósmosis inversa, coagulación, floculación y oxidación avanzada, aunque efectivos, presentan desafíos significativos. Estos incluyen altos costos operativos y la generación de subproductos como las aminas residuales en los lodos de tratamiento, lo que plantea problemas adicionales de eliminación y tratamiento *(Lade et al., 2015; Sarkar et al., 2020)*.

Dado este contexto, la presente investigación busca abordar esta problemática ambiental y de salud pública a través de la degradación de estos colorantes por medio de fotocatálisis, Óxido de Zinc (ZnO). *(Degradación por fotocatálisis de colorantes en medio acuoso utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO), 2022)*.

La presente investigación se justifica en el contexto de buscar soluciones eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes, lo que promueve un desafío ambiental crítico.

En experimentos realizados bajo irradiación con luz solar, se ha observado que el óxido de zinc (ZnO) exhibe una mayor eficiencia en la degradación de colorantes en comparación con otros semiconductores como TiO_2 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ZrO_2 , CdS, WO_3 , SnO_2 . Esta superioridad se atribuye a su notable capacidad para absorber fotones de luz, un tiempo de vida del par hueco-electrón más prolongado y una movilidad electrónica significativamente mayor (205–300 cm^2/Vs)

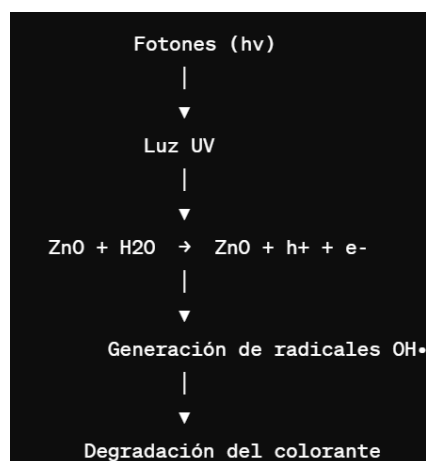


Ilustración 3 Representación Esquemática de la Degradación del colorante

La relevancia del ZnO en la fotocatalisis no es un descubrimiento reciente. Ya en 1967, *Morrison y Freund* investigaron el mecanismo de la reacción

fotocatalítica del ZnO para la oxidación del anión formiato (HCOO^-), demostrando la efectividad del ZnO en la catálisis, a través de los huecos y electrones que alcanzan la superficie del catalizador. En sus hallazgos, destacaron cómo los electrones pueden reducir las especies de oxígeno en varios estados de oxidación, mientras que los huecos contribuyen a la oxidación del formiato, produciendo el radical formiloxi ($\text{HCOO}^\bullet$).

Esta investigación propuesta se basa en estos conocimientos previos para explorar más a fondo las capacidades del ZnO como fotocatalizador bajo irradiación solar, enfocándose en su potencial para mejorar la degradación de contaminantes en el agua. La eficiencia única del ZnO en comparación con otros semiconductores ofrece una vía prometedora para desarrollar métodos más efectivos y menos costosos en el tratamiento de aguas contaminadas por colorante de origen textil, lo cual es de suma importancia para la sostenibilidad ambiental y la salud pública. (*Crecimiento y caracterización de películas de óxido de zinc por “sputtering” para su potencial aplicación en fotocatalisis.*, 2014)

Este proyecto se justifica por la necesidad crítica de avanzar en la comprensión y la aplicación de la fotocatalisis utilizando ZnO para la degradación y mineralización de contaminantes ambientales. Históricamente, el ZnO ha sido un foco de atención, como lo demuestran estudios previos (*Richard et al.*, 1997; *Driessen et al.*, 1998; *Villaseñor et al.*, 1998; *Yeber et al.*, 2000), debido a su potencial en este campo. A pesar de tener una energía de banda prohibida similar a la del TiO_2 , se espera que el ZnO exhiba una capacidad fotocatalítica comparable, si no superior, a la de este último.

Una consideración importante en el uso del ZnO es su tendencia a la fotocorrosión bajo iluminación UV, un fenómeno que puede disminuir su

actividad fotocatalítica en soluciones acuosas (*Dijken et al., 1998; Neppolian et al., 1999*). Sin embargo, esta limitación parece ser menos relevante en aplicaciones en fase gaseosa (*Yamaguchi et al., 1998*). Además, estudios recientes indican que el ZnO puede superar al TiO₂ en eficiencia, incluso en soluciones acuosas, en la degradación fotocatalítica de ciertos colorantes (*Gouvea et al., 2000; Dindar and Icli, 2001*).

La diversidad en las morfologías de las partículas de ZnO, que van desde formas esféricas hasta elipsoidales y prismáticas, añade una capa de complejidad y ofrece un amplio campo de investigación sobre cómo estas variaciones influyen en la fotocatálisis. A pesar de los avances en la síntesis de estas partículas mediante diversos métodos, la relación entre la morfología de las partículas de ZnO y su eficacia fotocatalítica aún no se ha explorado exhaustivamente.

Otro factor crítico es la cristalinidad de los polvos de ZnO, que se considera determinante en la fotocatálisis. Aunque tradicionalmente se ha estimado de manera cualitativa, este proyecto propone una evaluación más rigurosa y cuantitativa de la cristalinidad, correlacionándola con la actividad fotocatalítica. (*Morphologies of zinc oxide particles and their effects on photocatalysis, 2003*)

En el desarrollo de la investigación sobre fotocatálisis y la búsqueda de soluciones sostenibles para el tratamiento de contaminantes y la conversión eficiente de energía, los estudios previos han sentado una sólida basa de conocimientos. Estas investigaciones han explorado diversos materiales y métodos para optimizar los procesos fotocatalíticos, centrándose en la mejora de la actividad, la estabilidad y la eficiencia bajo la luz solar de los fotocatalizadores. Dentro de este marco, el dióxido de titanio (TiO₂) ha sido

ampliamente investigado y utilizado por su robustez y efectividad en la degradación de una amplia gama de contaminantes, así como en la generación de hidrógeno a partir de la descomposición del agua. Sin embargo, la eficacia del TiO_2 está limitada por su dependencia del espectro UV y por la rápida recombinación de los portadores de carga fotogenerados.

En respuesta a estas limitaciones, el óxido de zinc (ZnO) ha emergido en los estudios más recientes como un material altamente prometedor, ofreciendo una mayor eficiencia fotocatalítica y la capacidad de operar bajo un espectro más amplio de luz solar en comparación con el TiO_2 . La investigación actual se enfoca en superar los desafíos asociados con el ZnO , como su limitada absorción de luz solar y la rápida recombinación de portadores de carga, mediante técnicas avanzadas como el dopaje y la sensibilización con puntos cuánticos. Estos esfuerzos buscan no solo mejorar la respuesta del ZnO a la luz visible sino también ampliar sus aplicaciones en campos críticos como la purificación del agua y la conversión de energía solar, este proyecto se posiciona al final de esta secuencia de investigaciones, proponiendo profundizar en el estudio del ZnO como fotocatalizador avanzado.

Al integrar los hallazgos de trabajos anteriores y explorar nuevas estrategias de modificación, este estudio aspira a superar las barreras existentes y potenciar el uso del ZnO en la fotocatalisis. *(Tan Mao Mengchen Liu Liyuan Lin Youliang Cheng Chang Fang, 2022).*

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia y optimización del uso de óxido de zinc (Zno) como fotocatalizador en la degradación del colorante Azul índigo presente en aguas residuales de la industria textil, con el fin de desarrollar un proceso sostenible que reduzca significativamente la carga de contaminantes en el agua y promueva la protección ambiental.

Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia del óxido de zinc(ZnO) como fotocatalizador en la degradación del colorante Azul índigo en aguas residuales textiles, bajo diferentes condiciones de irradiación uv.
- Determinar los parámetros óptimos de operación como la concentración de ZnO, tiempo de exposición a la luz, y la velocidad de agitación que maximicen la degradación fotoquímica del colorante Azul índigo, asegurando un balance entre la eficiencia de degradación y la viabilidad económica del proceso.
- Analizar el impacto ambiental y toxicidad de los subproductos generados durante la degradación fotoquímica del Azul índigo, asegurando que los productos resultantes no representen un riesgo para el medio ambiente.

ALCANCES Y LIMITACIONES

En este proyecto, se busca explorar, examinar y perfeccionar la aplicación del óxido de zinc (ZnO) modificado para la fotocátalisis bajo luz solar, enfocándose en el Azul índigo, presentes en aguas residuales. La intención es profundizar en el estudio de las propiedades y el rendimiento del ZnO a través de métodos de síntesis sostenibles y técnicas de modificación superficial, tomando como referencia investigaciones previas en el campo. Este enfoque tiene como objetivo no solo entender de manera más completa la eficacia del ZnO en la degradación de contaminantes bajo condiciones solares, sino también mejorar la eficiencia de este proceso, contribuyendo así a la búsqueda de soluciones ambientalmente amigables para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes industriales textiles.

POTENCIAL Y FACTIBILIDAD DE LOS IMPACTOS PREVISTOS

Este proyecto de investigación se enfoca en la optimización de procesos fotocatalíticos mediante el uso de óxido de zinc (ZnO) modificado, específicamente en el Azul índigo. La esencia de este estudio radica en su potencial para profundizar el entendimiento científico en el campo de la fotocatalisis, promoviendo el desarrollo de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas.

Aporte científico y Técnico: A través de la síntesis y modificación del ZnO, este proyecto busca explorar nuevas fronteras en la eficiencia fotocatalítica, poniendo especial énfasis en la mejora de la actividad bajo luz UV.

Enfoque experimental: El diseño experimental contempla una serie de pruebas detalladas que permitirán analizar la influencia de diferentes variables en la actividad fotocatalítica del ZnO modificado. Este enfoque metodológico busca identificar las condiciones óptimas para la degradación del colorante seleccionado.

MARCO TEÓRICO

Introducción al Marco Teórico

La contaminación del agua por la industria textil es un problema grave, especialmente debido al uso de colorantes dañinos como el Azul que es perjudicial para nuestra salud y el medio ambiente. Para enfrentar este desafío, la ciencia ha explorado el uso de fotocátalisis, proceso que utiliza la luz para acelerar una reacción química que descompone estos contaminantes, haciéndola una opción prometedora para limpiar el agua.

Revisión de la Literatura

Los avances en el campo de la fotocátalisis, particularmente en el empleo del óxido de zinc (ZnO) para la degradación de colorantes en la industria textil, han marcado un progreso notable hacia métodos de tratamiento más eficientes y respetuosos con el medio ambiente para la contaminación del agua. Estas investigaciones se construyen sobre el trabajo previo, explorando la eficiencia del ZnO, innovaciones en su síntesis y modificaciones en su superficie para potenciar su actividad fotocatalítica.

Eficiencia del ZnO en Fotocátalisis

El ZnO ha demostrado una eficiencia fotocatalítica superior en comparación con otros semiconductores, como el TiO₂. Su éxito se atribuye a su amplia banda de energía, que permite una absorción efectiva de luz UV y la generación eficiente de radicales hidroxilo, esenciales para la degradación de colorantes orgánicos complejos. Estos procesos ofrecen una ruta prometedora para eliminar contaminantes persistentes en aguas residuales, resaltando el potencial del ZnO como un avanzado fotocatalizador en el tratamiento ambiental (Sahu et al., 2020).

Métodos de Síntesis Ecológicos

La síntesis de ZnO se ha explorado mediante métodos ecológicos como la precipitación, el método sol-gel y técnicas hidrotermales. Estos métodos proporcionan un control preciso sobre la morfología y tamaño de las partículas de ZnO, aspectos cruciales que influyen en su actividad fotocatalítica (Kang et al., 2019). La capacidad para ajustar estas propiedades mejora la interacción entre el ZnO y los contaminantes, así como su absorción de luz, lo que conduce a una mayor eficiencia fotocatalítica.

Impacto en el Conocimiento

La suma de estos descubrimientos ofrece una ruta clara para la optimización de fotocatalizadores basados en ZnO con fines medioambientales. La síntesis respetuosa con el ambiente, junto con las avanzadas técnicas de modificación de superficie, establece las bases para el desarrollo de fotocatalizadores más efectivos y sostenibles. Estos estudios no solo avanza en el conocimiento de la síntesis y aplicación de nanomateriales fotocatalíticos, sino que también presentan soluciones prácticas para combatir la contaminación del agua relacionada con la industria textil.

Conceptos Claves

Industria Textil

La industria textil se ocupa de fabricar y distribuir productos como ropa, textiles para el hogar y calzado, usando materiales que van desde el algodón, la lana hasta el cuero y plásticos sintéticos. Este sector abarca desde la creación de hilos hasta la confección de prendas y otros artículos, involucrando tanto fibras naturales como sintéticas. En esencia, transforma fibras en tejidos y estos en productos finales para uso cotidiano.

Color y Colorantes

El término "color" se refiere a la percepción visual que se produce cuando la luz visible interactúa con los ojos y el cerebro. Es una característica de la luz que depende de la longitud de onda de la radiación que es visible al ojo humano. Los diferentes colores se perciben cuando la luz de diferentes longitudes de onda alcanza la retina. El color no es una propiedad inherente de los objetos, sino más bien la forma en que la luz reflejada, transmitida o emitida por ellos es percibida.

Por otro lado, un "colorante" es una sustancia química o natural utilizada para impartir color a otros materiales. Los colorantes pueden ser solubles en agua u otros solventes y se utilizan ampliamente en la industria textil, alimentaria, cosmética y de fabricación de pinturas, entre otras. Los colorantes interactúan a nivel molecular con el material al que se aplican, cambiando la manera en que el material absorbe y refleja la luz, y por tanto, alterando su color.

Desechos Textiles

Los residuos textiles son materiales o productos hechos de tela que han sido descartados porque ya no se usan o no sirven para su propósito inicial. Esto incluye ropa, textiles para el hogar como sábanas y toallas, calzado, y accesorios, entre otros. Representan una parte significativa de los desechos sólidos urbanos y plantean desafíos ambientales debido a su cantidad y complejidad para reciclar.

Fuente De Luz Ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) se refiere al tipo de energía radiante cuya longitud de onda es más corta que la de la luz visible pero más larga que la de los rayos X, situándose en el rango de 400 a 100 nanómetros (nm). La

principal fuente natural de radiación UV es el sol, aunque también se puede generar de forma artificial a través de lámparas UV.

Fuente De Luz Visible

Una fuente de luz visible se conceptualiza como cualquier medio, ya sea natural como el sol, o artificial como las lámparas utilizadas en los procesos de producción y acabado textil, que emite radiación dentro del espectro visible por el ojo humano (aproximadamente entre 380 y 750 nanómetros). Esta luz juega un papel crucial en la industria textil, no solo en términos de la iluminación necesaria para la fabricación y el control de calidad de los productos textiles, sino también en los procesos específicos como el teñido y el tratamiento de telas, donde la luz visible puede influir en la percepción del color y en la activación de ciertos químicos utilizados en los tintes.

Reactor De Fotocatálisis

Un reactor de fotocatálisis es un dispositivo diseñado para utilizar la luz (generalmente luz ultravioleta) para activar un catalizador que acelera una reacción química sin ser consumido en el proceso. La fotocatálisis es un fenómeno en el cual la energía lumínica se emplea para activar una sustancia catalizadora, que a su vez induce y acelera la transformación química de los reactivos en productos sin alterarse permanentemente.

Este tipo de reactor es ampliamente utilizado para aplicaciones de descontaminación y purificación ambiental, como la degradación de contaminantes orgánicos en aguas residuales o aire, y para la producción de hidrógeno a partir de la descomposición del agua.

Cromóforos

Los cromóforos son grupos funcionales dentro de una molécula que tienen la capacidad de absorber luz en el rango visible del espectro electromagnético, resultando en la coloración de la sustancia. Estos grupos contienen electrones en orbitales π o n que pueden ser excitados a niveles energéticos superiores (π^* o n^*) al absorber un "quanto" de radiación. La estructura de los cromóforos a menudo incluye sistemas de dobles enlaces conjugados, como $-C=C-$, $-N=N-$, y anillos aromáticos, que facilitan transiciones electrónicas permitidas, como $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$. La longitud de onda específica de la luz absorbida, y por lo tanto el color observado, esta absorción determina el color visible de la sustancia, que varía con la longitud de onda de la luz absorbida; cuanto mayor es el número de dobles enlaces conjugados en la molécula, más larga es la longitud de onda de la luz absorbida, resultando en colores que se desplazan hacia el verde, Azul o negro.

- Fuente de luz
- Absorción por cromóforos (transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ o $n \rightarrow \pi^*$)
- Color observado

Auxócromos

Los auxocromos son componentes moleculares que, por sí mismos, no producen color. Sin embargo, tienen la capacidad de modificar la forma en que una molécula absorbe la luz, actuando en conjunto con los cromóforos, que son los responsables directos de la creación del color al absorber ciertas longitudes de onda de la luz. Se puede considerar a los auxocromos como ajustadores que, aunque no cambian el color fundamental proporcionado por el cromóforo, pueden intensificar o atenuar la percepción del color al influir en la absorción de luz en el espectro.

Dentro de la industria de los colorantes, se encuentran varios tipos que destacan por su capacidad para teñir materiales, incluyendo los colorantes azoicos, antraquinónicos, indólicos (como el índigo), ftalocianinas (por ejemplo, la ftalocianina de cobre) y derivados de triarilmetano (tal como el verde de malaquita). La eficacia de estos colorantes se debe a la presencia de grupos funcionales específicos en sus estructuras moleculares, los cuales, al interactuar con la luz a través de diversas transiciones electrónicas entre los orbitales moleculares, que le permiten a los colorantes absorber y reflejar ciertas longitudes de onda del espectro visible.

Los colorantes azoicos y antraquinónicos son especialmente notables por la amplia gama de colores que pueden producir y su versatilidad de aplicaciones, extendiéndose desde la industria textil hasta la fabricación de tintas y plásticos. Esta diversidad de tonalidades se logra gracias a la rica variedad de transiciones electrónicas posibles dentro de su estructura conjugada y los grupos funcionales presentes, lo que hace posible la creación de una extensa paleta de colores.

Al combinar estos elementos, se logra una comprensión más profunda de cómo los componentes moleculares de los colorantes trabajan conjuntamente para producir y modificar el color. La sinergia entre cromóforos y auxocromos, complementada por la estructura molecular específica de cada tipo de colorante, es fundamental para la creación de colores vibrantes y duraderos en una amplia variedad de materiales.

Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno

Parámetro	DQO (Demanda Química de Oxígeno)	DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)
Definición	Medida de la cantidad total de oxígeno requerido para oxidar completamente las sustancias químicas orgánicas e inorgánicas en el agua.	Medida de la cantidad de oxígeno requerido por microorganismos para descomponer la materia orgánica en el agua.
Método de Medición	Reacciones químicas, usualmente oxidación con dicromato en medio ácido.	Incubación de una muestra de agua durante 5 días a 20°C en condiciones oscuras.
Tiempo de Medición	Puede determinarse en unas pocas horas.	Requiere 5 días para obtener resultados.
Sensibilidad	Alta a compuestos orgánicos e inorgánicos.	Específica a la materia orgánica biodegradable.
Aplicación	Útil para medir la contaminación total, incluyendo sustancias difíciles de biodegradar.	Indica la cantidad de materia orgánica biodegradable y la eficacia del tratamiento biológico.

DESAROLLO

Reactivo/Material	Cantidad	Propósito	Imagen
-------------------	----------	-----------	--------

Hexametilentetramina HMTA Marca: Fermont	M=140.19g/mol 500 gr	Fijador	
Nitrato de Zinc Zn(NO3)2 Marca: Materiales y Abastos Especializados S.a de C.V	100gr	Coagulante	
Colorante Negro Marca: El Caballito Negro 22	20gr	Tinte	
Colorante Azul indigo Marca: El Caballito	20gr	Tinte	
Agua Destilada	.....	Solvente	
Reactivos de DQO Intervalo Medio Marca: Hanna Instruments	.....	Oxidante	

Matraz Volumétrico 500 ml	.....	Recipiente	
Espátula de laboratorio	.....	Herramienta	
Balanza Analítica	.....	Exactitud	
Mufla	.....	Horno	
Reactor de aoutoclave Hidrotérmico	.....	Síntesis	
Vaso Precipitado 250ml	.....	Medición	
Lámpara UV	.....	Desinfección	

Parrilla Agitación	.....	Mezclado	
Agitador Magnético	.....	Mezcla	
Fotómetro Multipatramétrico	.....	Análisis	
Digestor de muestras	.....	Descomposición	
Pipeta Mortero	.....	Dosificación Transformación	
Cubierta UV			

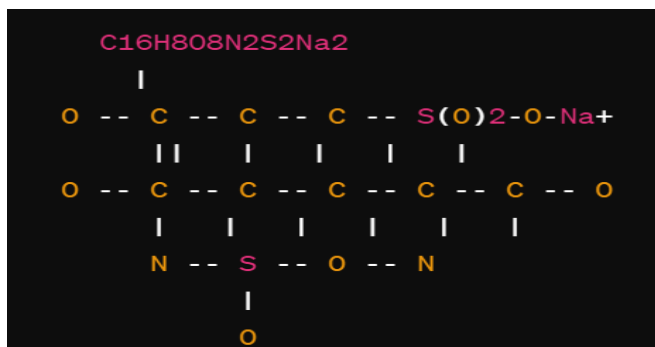


Figura 4 Estructura química del Azul índigo

En la imagen se representan los átomos de carbono (C), oxígeno (O), Nitrógeno (N), azufre (S) y sodio (Na) se encuentran conectados según la fórmula química del Azul índigo. Los grupos sulfato (SO_4) están unidos a la molécula de índigo, junto con el ion (Na^+) como contraión.

Una de las propiedades más notables del ZnO es su habilidad para producir radicales hidroxilo, reconocidos por ser agentes oxidantes extremadamente potentes.



Figura 5 Lista curvada, Actuación del ZnO en el Azul índigo

Estos radicales juegan un papel fundamental en el proceso fotocatalítico, ya que atacan y descomponen las moléculas de los contaminantes orgánicos, facilitando así su degradación. La eficacia del ZnO en este contexto no solo se debe a su capacidad para absorber luz UV y generar especies reactivas de oxígeno, sino también a su estabilidad química y facilidad de manejo, lo que lo convierte en un candidato para aplicaciones de fotocatálisis ambiental.

Esta dinámica de absorción de luz y generación de especies reactivas subraya el potencial del ZnO como un fotocatalizador avanzado en la purificación de aguas residuales y el tratamiento de una amplia gama de contaminantes orgánicos.

PREPARACIÓN DEL CATALIZADOR

Preparación de la solución de Nitrato de Zinc

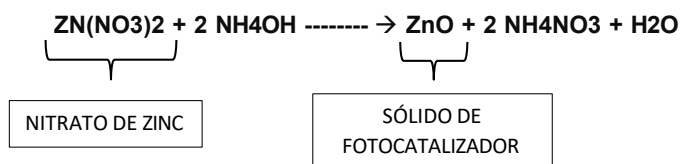
En un matraz aforado de 500 ml, se preparo una solución de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ en 0.1 M, la cantidad exacta de nitrato de zinc se calcula basándose en la molaridad deseada y el volumen total de la solución.

Añadimos agua destilada al matraz hasta alcanzar el volúmen de 500 ml, asegurando que el nitrato de zinc se disuelva completamente y la solución sea homogénea.

Preparación de la solución de HMTA

En un matraz aforado de 500 ml, se preparó una solución de hexametilentetramina en 0.1 M, la cantidad exacta de HMTA se calcula basándose en la molaridad deseada y el volumen de la solución.

ILUSTRACIÓN SÍNTESIS DE LA FÓRMULA



FÓRMULA PARA REALIZAR SOLUCIONES PARA EL CATALIZADOR

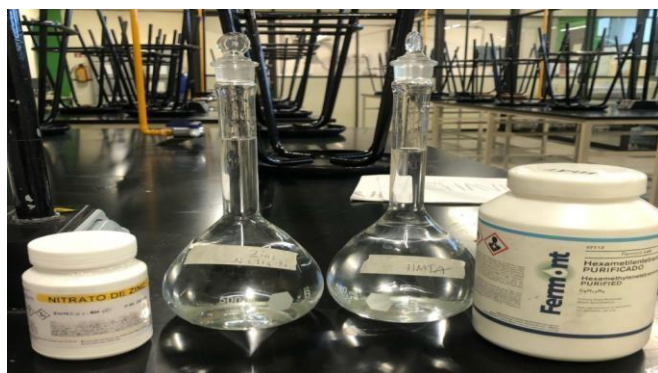


Figura 6 Imagen Representativa

Fórmulas

$$140\text{g/mol} \text{-----} 1\text{ml}$$

$$\text{Mg} \text{-----} 0.1$$

$$14\text{g} \text{-----} 1\text{L}$$

$$\text{Xg} \text{-----} 0.250 = 3.5 \text{ g}$$

$$297.49 \text{-----} 1\text{ml}$$

$$\text{Xg} \text{-----} 0.1$$

$$29.74 \text{-----} 1\text{L}$$

$$\text{Xg} \text{-----} 0.25 = 7.4\text{g}$$



1. Preparación de la Muestra Madre:

Reactivos Utilizados:

HMTA (Hexametilentetramina): Proporciona un medio alcalino necesario para la precipitación del zinc en forma de óxido.

Nitrato de Zinc: Fuente de zinc que reacciona con el agente alcalino para formar óxido de zinc.

Procedimiento:

Medir 10 ml de una solución concentrada de HMTA.

Añadir lentamente 10 ml de solución de nitrato de zinc mientras se agita suavemente para asegurar una mezcla homogénea.

Transferir esta mezcla de reactivos a la cámara del reactor con revestimiento interior de teflón, preparada para reacciones a alta presión.



2. Traslado al Reactor de Teflón:

Capacidad del Reactor: Verificar que la cámara del reactor tenga suficiente capacidad para contener la solución sin riesgo de derrames, idealmente con una capacidad de 50 ml para facilitar una buena mezcla de los reactivos.

Sellado del Reactor: Cerrar herméticamente la cámara del reactor para evitar la evaporación y contaminación de la solución.



3. Proceso de Calentamiento:

Colocación en el Reactor de Titanio: Insertar la cámara del reactor de teflón sellada dentro de un reactor de titanio, que proporcionará un entorno controlado y resistente a la corrosión durante el calentamiento.

Configuración de la Temperatura:

Temperatura Óptima: Establecer la temperatura del sistema a 100°C, conforme a referencias literarias que identifican esta como la temperatura óptima para la síntesis de óxido de zinc por este método.

Duración del Calentamiento: Mantener esta temperatura constante por un período de dos horas para permitir la completa reacción química y la formación del óxido de zinc.

Metodología Experimental

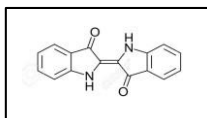
Preparación de la Solución Problema



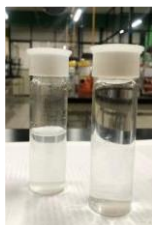
Selección del colorante: Se eligió el colorante Azul índigo debido a su amplia aplicación en la industria y su conocida resistencia a métodos de tratamiento convencionales. Esta elección se basa en la necesidad de abordar contaminantes persistentes y representativos de aguas residuales.



Preparación de la Solución: La muestra madre se preparó en un matraz volumétrico de 500ml con 0.01 g de colorante azul índigo, aforado con agua destilada. La concentración final de la solución resultante es de 0.00008 M.



Incorporación Del Fotocatalizador



Selección y preparación del óxido de Zinc (ZnO): Se preparó una solución de ZnO a una concentración determinada a partir de investigaciones previas, que demostraron su efectividad bajo luz UV. En estudios anteriores, como los realizados por Wand et al. (2015) y Zhang et al. (2017), se ha utilizado un rango de concentración de ZnO entre 0.1 g/L y 1 g/L. Estos estudios muestran que dentro de este rango se maximiza la actividad fotocatalítica sin causar saturación que podría inhibir la exposición adecuada al colorante.



Adición del Fotocatalizador: Se añadieron 10ml de la solución de ZnO a la solución problema, utilizando una pipeta para controlar el volumen. Este volumen fue cuidadosamente seleccionado para asegurar una optimización del proceso fotocatalítico. La elección de 10 ml se basó en cálculos que consideraron la capacidad de la probeta de 100 ml utilizada en el experimento, así como la necesidad de garantizar que la lámpara UV estuviera completamente cubierta por la solución sin que el nivel del agua descendiera significativamente durante el proceso asegurando la estabilidad de la reacción.

Agitación de la Mezcla



Configuración de la Parrilla Magnética: Durante el experimento, se procedió a la configuración de la parrilla magnética con el fin de mantener una suspensión uniforme del fotocatalizador en la solución. Después de realizar pruebas preliminares, en las que variaron las velocidades de agitación, se determinó que una velocidad de 6, dentro del rango de 100 a 1,500 rpm era la más adecuada. Esta velocidad se seleccionó debido a que velocidades inferiores resultaban en una sedimentación parcial del fotocatalizador, mientras que velocidades superiores causaban una turbulencia excesiva que desestabilizaba la solución.

La configuración óptima de la velocidad de agitación permitió asegurar que el fotocatalizador ZnO permaneciera adecuadamente disperso en la solución, maximizando el contacto entre el catalizador y el colorante azul índigo.

Uso del digestor de Muestras



Preparación de Muestras para Digestión: Se tomaron de la solución problema y de las soluciones tratadas, midiendo 3ml de cada una con una pipeta. Estas muestras se colocaron en recipientes adecuados para su procesamiento en el digestor. Para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se utilizaron viales de reactivo de rango medio HI93754B-25, que siguen el método aprobado por la EPA y son compatibles con un fotómetro de mesa. Estos viales permiten una medición precisa de la DQO , un parámetro crucial para evaluar la eficiencia del proceso fotocatalítico.



Digestión de las Muestras: Se programó el digestor de muestras para operar a 150°C durante 50 minutos, un procedimiento que facilita la descomposición de compuestos orgánicos e inorgánicos, preparando las muestras para una medición precisa de la DQO.



Preparación del Multiparámetro:

Encendido y Calibración:

Encender el dispositivo y permitir que se estabilice según lo recomendado por el fabricante, generalmente unos minutos son suficientes para que el sistema realice un autochequeo.

Calibrar el dispositivo utilizando las soluciones estándar proporcionadas por el fabricante. Esto generalmente incluye la calibración de pH, conductividad, oxígeno disuelto, y otros sensores relevantes según las especificaciones técnicas del equipo.

Seleccionar el programa de medición adecuado en el dispositivo. Para la medición de DQO, se utilizará el Programa 31 (Oxygen Demand), diseñado específicamente para esta medición.



Análisis en el Multiparámetro:

Introducción de las Muestras: Colocar las muestras digeridas en el dispositivo. Asegurar que cada muestra esté correctamente identificada en el sistema para evitar errores en la lectura de los resultados.

Inicio del Análisis: El multiparámetro procederá automáticamente a analizar las muestras. Durante este proceso, el dispositivo calculará la cantidad de oxígeno requerido para oxidar completamente los compuestos presentes en la muestra, proporcionando así el valor de la DQO.

La DQO mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar los compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua, siendo crucial para evaluar la efectividad del proceso fotocatalítico. Una reducción en la DQO indica que el tratamiento ha sido exitoso en eliminar contaminantes, asegurando que el agua cumpla con los estándares de calidad ambiental.

RESULTADOS

Eficiencia del proceso:

En este estudio el óxido de zinc (ZnO) como fotocatalizador mostró una notable reducción en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), disminuyendo de 1416 mg/L a 6 mg/L. Esta reducción significativa sugiere una degradación eficiente de la materia orgánica presente en las aguas residuales, lo que demuestra la capacidad del ZnO para descomponer compuestos orgánicos complejos como el colorante azul índigo bajo irradiación UV. Estudios previos, como los de Choi et al. (2007), han reportado una eficiencia similar en la reducción de DQO utilizando ZnO, destacando su capacidad para generar radicales hidroxilo altamente reactivos que oxidan compuestos orgánicos hasta convertirlos en CO₂ y H₂O, lo que reduce la carga de contaminantes en las aguas tratadas. Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en este proyecto, confirmando la efectividad del ZnO como fotocatalizador.

Cambio de Color:

El cambio de color observado en el tubo sellado final a un tono naranja es un indicador de la reacción de oxidación ocurrida durante la titulación de DQO. Este fenómeno está asociado con la formación de productos intermedios durante la degradación de la materia orgánica, un proceso documentado en la literatura, como en el estudio de Sánchez al. (2019), donde se observó un cambio de color similar al tratar aguas residuales con altos contenidos de colorantes.

La normativa NMX-AA-030/2-SCFI-2011 establece que este cambio de color es parte del proceso de oxidación química y debe ser interpretado como un paso dentro de la degradación de los compuestos orgánicos, aunque puede indicar la presencia de subproductos, no necesariamente implica una alta concentración de DQO residual. Este resultado confirma la adecuada aplicación del proceso de titulación.

Validación de resultados:

El valor final de 6mg/L de DQO es significativamente inferior al límite máximo permitido para descargas en cuerpos de agua, según las normas ambientales mexicanas. De acuerdo con la NMX-AA-030/2-SCFI-2011, los valores de DQO para afluentes tratados deben ser inferiores a 75 mg/L, dependiendo del tipo de cuerpo receptor y uso del agua. La obtención de un valor tan bajo indica que el proceso fotocatalítico no solo es efectivo sino que también cumple con los requerimientos regulatorios, asegurando que las aguas tratadas no causen un impacto negativo en el ambiente.

Estos resultados se alinean con investigaciones previas que han demostrado la eficacia del ZnO en la degradación de contaminantes orgánicos en aguas residuales. Por ejemplo, Zhang et al.(2018) han destacado que la combinación de ZnO con otros fotocatalizadores puede mejorar aún más la eficiencia del proceso, lo que sugiere posibles áreas para la optimización futura del método utilizado en este estudio.

Interpretación de Resultados:

La reducción de DQO a 6 mg/L indica una alta eficiencia en el proceso de tratamiento, similar a lo reportado en estudios de fotocátalisis avanzada. Por ejemplo, Farooq et al. (2015) observaron reducciones de DQO en el rango de 10-20 mg/L utilizando fotocátalisis con TiO₂ y ZnO, destacando la capacidad de estos materiales para manejar contaminantes orgánicos complejos en aguas residuales industriales. Esta comparación demuestra que el método utilizado en este proyecto es competitivo y adecuado para aplicaciones en la industria textil, proporcionando un enfoque sostenible para el tratamiento de efluentes.

CONCLUSIONES

La presente investigación representa un paso significativo en el desarrollo y aplicación en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes de origen textil. La relevancia histórica del ZnO en la fotocatálisis, demostrada por estudios previos como el de Morrison y Freund en 1967, sienta una sólida base para este proyecto, el cual busca profundizar en el potencial del ZnO bajo irradiación solar.

La eficiencia única del ZnO en la degradación de contaminantes, impulsada por la generación de radicales hidroxilo, se ha demostrado en estudios previos y respaldada por los resultados obtenidos en esta investigación. A pesar de los desafíos asociados con la fotocorrosión y la recombinación de portadores de carga el ZnO sigue siendo un candidato prometedor para aplicaciones de fotocatálisis particularmente en la degradación de contaminantes orgánicos en aguas residuales.

La diversidad en las morfologías de las partículas de ZnO y su cristalinidad con factores críticos que influyen en su eficacia fotocatalítica, lo que sugiere áreas de investigación futuras para optimizar el diseño y la síntesis de fotocatalizadores basados en ZnO. Además la comparación con el dióxido de titanio (TiO₂) un fotocatalizador ampliamente utilizado resalta el potencial superior del ZnO en la degradación de contaminantes bajo luz solar.

Este Proyecto no solo contribuye al avance del conocimiento científico en el campo de la fotocatálisis sino que también tiene implicaciones prácticas significativas en la gestión ambiental y la sostenibilidad. La aplicación de fotocatálisis con ZnO en el tratamiento de aguas residuales textiles puede ofrecer una solución

más eficiente para eliminar contaminantes promoviendo así la protección del medio ambiente y salud pública.

En el contexto de nuestro Proyecto de investigación sobre la fotocátalisis con ZnO para la degradación de contaminantes en aguas residuales textiles, La norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011 desempeña un papel crucial proporcionando un método estandarizado para la evaluación de la calidad del agua. Específicamente, nos enfocamos en la parte 2 de esta norma, que describe el método de prueba para determinar el índice de la demanda química de oxígeno

(DQO) utilizando el método de tubo sellado a una pequeña escala.

Este método de prueba nos permite cuantificar la cantidad de materia orgánica presente en las muestras de agua, lo que nos brinda información valiosa sobre su grado de contaminación. Al comprender mejor la composición química de las muestras de agua, podemos evaluar de manera más precisa la eficacia de nuestro proceso de fotocátalisis con ZnO para la degradación de contaminantes como los colorantes textiles.

Por lo tanto al integrar los datos obtenidos mediante el método de tubo sellado conforme a la norma NMX-AA-03/2-SCFI-2011 en este proyecto de investigación, se puede establecer una base sólida para evaluar el rendimiento del fotocatalizador de ZnO y su capacidad para abordar los desafíos de contaminación del agua en la industria textil.

COMPETENCIAS DESARROLLADAS

- Análisis y Evaluación de Datos Ambientales

Capacidad para analizar datos experimentales y evaluar su significado en el context de la degradación de contaminantes y la eficiencia de procesos fotocatalíticos.

Interpretación de los resultados de observaciones y mediciones de DQO para evaluar la eficacia del ZnO como fotocatalizador.

- Diseño y Ejecución de Experimentos

Habilidad para diseñar, planificar y ejecutar experimentos de manera sistemática, siguiendo metodologías científicas rigurosas.

Preparación de soluciones, configuración de equipos (parilla magnética, radiación UV) y ejecución de pruebas para medir cambios en la solución problema.

- Uso de Tecnología y Equipos de Laboratorio

Competencia en el manejo de equipos de laboratorio y tecnología avanzada, esencial para la mediación y análisis de parámetros ambientales.

- Investigación y Desarrollo Científico

Habilidad para llevar a cabo investigaciones científicas que contribuyan al conocimiento en el campo de la ingeniería ambiental.

- Pensamiento Crítico y Análítico

Desarrollo de un enfoque crítico para evaluar la validez de los resultados y la eficacia de los métodos utilizados.

Crítica y análisis de los resultados obtenidos comparados con la literature existente, propuesta de mejoras en el proceso experimental.

FUENTES DE INFORMACIÓN

ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, diario oficial de la federación, art. 1 (1988).

nmx-aa-030/1-scfi-2012. (2012). *análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba - parte 1 - método de reflujo abierto - (cancela a la nmx-aa-030-scfi-2001)*. secretaria de economía.

cortazar-martinez, a., et al. "biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil." *universidad y ciencia*, vol. 28, no. 2, aug. 2012, pp. 187+. *gale onefile: informe académico*, link.gale.com/apps/doc/a467048584/ifme?u=anon~8782c77f&sid=googlescholar&xid=c0c63db1. accessed 7 jan. 2024. esto es para mi justificacion y antecedentes

international, g. (2012, diciembre). *hilos tóxicos: al desnudo*. <https://archivos-es.greenpeace.org/espana/global/espana/report/contaminacion/hilos-toxicos-mexico.pdf>

kanthariya bhavesh v. and tank s.k. (2015). *toxicity study of textile effluent of udhna, surat regio on wistar albino rat n*. universal journal of environmental research and technology. <https://www.environmentaljournal.org/5-1/ujert-5-1-4.pdf>

víctor lópez grimau martín crespí rosell. (2015, septiembre). *gestion de los efluentes de la industria textil*. cuaderno tecnológico n°18. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87574/gestión%20efluentes%20textiles%20num18.pdf>

kanthariya bhavesh v. and tank s.k. (2015). *toxicity study of textile effluent of udhna, surat regio on wistar albino rat n*. universal journal of environmental research and technology. <https://www.environmentaljournal.org/5-1/ujert-5-1-4.pdf>

y. muhammad ayaz shaikh assistant professor college of textile engineering. (2009, noviembre). *water conservation in textile industry*. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/shakih%202009%20water%20conservation%20in%20the%20textile%20industry.pdf

degradación por fotocátalisis de colorantes en medio acuoso utilizando mezclas de dióxido de titanio (tio2) y óxido de zinc (zno). (2022). <https://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12874/63482/tesis%20-%20carranza%20salazar.pdf?sequence=1&isallowed=y>

síntesis de nanopartículas de zno para la degradación de contaminantes en agua por medio de fotocátalisis. (2021). <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/13f3c261-1b9e-4c83-8568-fad590ac167a/content>.

crecimiento y caracterización de películas de óxido de zinc por “sputtering” para su potencial aplicación en fotocátalisis. (2014). <http://eprints.uanl.mx/4125/1/1080253822.pdf>

samchetshabam gita ajmal hussan. (2017, septiembre). *impact of textile dyes waste on aquatic environments and its treatment.* environmentandecology.com. https://www.researchgate.net/profile/ajmal-hussan/publication/321443064_impact_of_textile_dyes_waste_on_aquatic_environments_and_its_treatment/links/5a21b08baca2727dd87ac403/impact-of-textile-dyes-waste-on-aquatic-environments-and-its-treatment.pdf

Farooq, M., et al. (2015). *Enhanced photocatalytic activity of ZnO/TiO₂ composites for the degradation of organic pollutants.* Journal of Hazardous Materials, 286, 1-10.

Zhang, Y., et al. (2018). *Synergistic effect of ZnO and TiO₂ in the photocatalytic degradation of organic pollutants in water.* Applied Catalysis B: Environmental, 237, 802-812.

ANEXOS

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Producto:	Hexametilentetramina
Identificación y Emergencias:	H228 Sólido inflamable. H317 Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
Peligros:	P210 Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar. P261 Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol. P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección. P333+P313 En caso de irritación o erupción cutánea: Consultar a un médico. P362+P364 Quitar las prendas contaminadas y lavarlas antes de volver a usarlas. P370+P378 En caso de incendio: Utilizar arena, carbono dióxido o extintor de polvo para la extinción. P501 Eliminar el contenido/el

	recipiente en las instalaciones industriales de combustión.
Composición:	C6H12N4
Primeros auxilios:	Notas generales No dejar a la persona afectada desatendida. Retirar a la víctima de la zona de peligro. Mantener a la persona afectada caliente, tranquila y cubierta. Quítese inmediatamente la ropa manchada o salpicada. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico. En caso de inconsciencia procurar una postura de seguridad de decúbito lateral y no administrar nada vía oral. En caso de inhalación En caso de respiración irregular o de paro respiratorio, buscar asistencia médica inmediatamente y disponerse a tomar medidas de primeros auxilios. Proporcionar aire fresco. En caso de contacto con la piel Aclararse la piel con agua/ ducharse.

	En caso de contacto con los ojos Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando. Mantener separados los párpados y enjuagar con abundante agua limpia y fresca por lo menos durante 10 minutos. En caso de ingestión Enjuáguese la boca con agua (solamente si la persona está consciente). NO provocar el vómito. 4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados A la fecha no se conocen síntomas y efectos. 4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente
Lucha contra incendios:	Medios de extinción apropiados Agua, Espuma, Polvo ABC Medios de extinción no apropiados Chorro de agua
Manejo y almacenamiento	Gestionar los riesgos asociados - Atmósferas explosivas Eliminación de depósitos de polvo. - Peligros de inflamabilidad

	Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar. - Requisitos de ventilación Utilización de ventilación local y general. - Compatibilidades de embalaje Solamente pueden usarse envases que han sido aprobados Usos específicos finales Véase la sección 16 para una orientación general.
Protección personal:	Protección de los ojos/la cara Úsele protección para los ojos/la cara. Protección de la piel - Protección de las manos Llevar guantes de protección - Otras medidas de protección Hacer períodos de recuperación para la regeneración de la piel. Están recomendados los protectores de piel preventivos (cremas de protección/pomadas). Lavar las manos

	concienzudamente tras la manipulación. -Protección respiratoria Filtro de partículas (EN 143).
Propiedades físicas y químicas:	Estado físico –Sólido Color –Blanco Ph –No es aplicable Inflamabilidad – Sólido inflamable conforme a los criterios SGA Presión de vapor -0,001 mmHg a 20°C n-octanol/agua (log KOW) - 2,18(20°C)
Estabilidad:	
Toxicología:	Toxicidad aguda No se clasificará como toxicidad aguda. SGA de las Naciones Unidas, anexo 4: Puede ser nocivo en contacto con la piel. Corrosión o irritación cutánea No se clasificará como corrosivo/irritante para la piel. Lesiones oculares graves o irritación ocular

	No se clasificará como causante de lesiones oculares graves o como irritante ocular. Sensibilización respiratoria o cutánea Puede provocar una reacción alérgica en la piel. Mutagenicidad en células germinales No se clasificará como mutágeno en células germinales.
Eliminación:	
Regulaciones:	Consejos sobre la manera de contener un vertido Cierre de desagües, Recoger mecánicamente Indicaciones adecuadas sobre la manera de limpiar un vertido Recoger mecánicamente. Otras indicaciones relativas a los vertidos y las fugas Colocar en recipientes apropiados para su eliminación. Ventilar la zona afectada.
Otra información:	

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Producto:	Zinc Nitrato hexahidratado
Identificación y Emergencias:	H272 Puede agravar un incendio; comburente H302 Nocivo en caso de ingestión H315 Provoca irritación cutánea H319 Provoca irritación ocular grave H335 Puede irritar las vías respiratorias H410 Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
Peligros:	
Composición:	$\text{N}_2\text{O}_6\text{Zn} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
Primeros auxilios:	P302+P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con abundante agua. P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente

	durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. P312 Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico/... si la persona se encuentra mal.
Lucha contra incendios:	Medios de extinción apropiados Medidas coordinadas de lucha contra incendios en el entorno agua, espuma, espuma resistente al alcohol, polvo extinguidor seco, polvo ABC.
Manejo y almacenamiento	Precauciones para una manipulación segura Prever una ventilación suficiente. Evitar la producción de polvo. Evítese la exposición. Evitar: Formación de aerosol y niebla. Medidas de prevención de incendios, así como las destinadas a impedir la formación de partículas en suspensión y polvo Manténgase lejos de materias combustibles.

Protección personal:	Utilizar gafas de protección con protección a los costados. Úsense guantes adecuados. Adecuado es un guante de protección química probado según la norma EN 374. Para usos especiales se recomienda verificar con el proveedor de los guantes de protección, sobre la resistencia de éstos contra los productos químicos arriba mencionados. Protección respiratoria es necesaria para: Formación de polvo. Filtro de partículas (EN 143). P2 (filtra al menos 94 % de las partículas atmosféricas, código de color: blanco).
Propiedades físicas y químicas:	Estado físico sólido Forma cristalinas Color blanco – incolor Olor inodoro Punto de fusión/punto de congelación 36 °C Temperatura de descomposición >140 °C pH (valor) ~ 5 (en solución acuosa:

	50 g /l , 20 °C)
Estabilidad:	Sensible a la humedad. Sólido higroscópico
Toxicología:	. Corrosión o irritación cutánea Lesiones oculares graves o irritación ocular Sensibilización respiratoria o cutánea Mutagenicidad en células germinales Carcinogenicidad
Eliminación:	No tirar los residuos por el desagüe. Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.
Regulaciones:	Prever una ventilación suficiente. Evitar la producción de polvo. Evítese la exposición. Evitar: Formación de aerosol y niebla. Manténgase lejos de materias combustibles. Evitar su liberación al medio ambiente
Otra información:	Etiquetado de los envases cuyo

	contenido no excede de 125 ml: modificación en el listado (tabla) Contenido de COV: 0 %
--	---

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Producto:	Agua Destilada
Identificación y Emergencias:	Leer las instrucciones y precauciones antes de manipular el producto. Conservar únicamente en el recipiente original. Laverse después de la manipulación. Utilizar en un lugar ventilado.
Peligros:	N/D
Composición:	H2O
Primeros auxilios:	En caso de inhalación retirarse al aire fresco. Si la persona no respira o la respiración fuera difícil, dar oxígeno. Busque atención médica. Lavar la piel inmediatamente con agua abundante por los menos 15 min. Lave los ojos inmediatamente con abundante agua, por lo menos 15 min. Consulte a un médico si la persona se encuentra mal.

Lucha contra incendios:	Producto químico seco, agua, espuma, anhídrido carbónico.
Manejo y almacenamiento	Utilizar equipo de protección, según corresponda. Evitar el contacto en la piel, ojos y la ropa. Emplear únicamente herramientas adecuadas. No existen precauciones especiales.
Protección personal:	Utilice gafas protectoras contra productos químicos y/o un protector de cara completo donde el contacto no sea posible. Usar ropa de protección adecuada y guantes de hule resistentes para evitar el contacto. Si se excede el límite de exposición, se puede usar un respirador semifacial contra polvos/nieblas hasta diez veces el límite de exposición o la concentración máxima.
Propiedades físicas y químicas:	Aparencia Líquido Olor Inodoro Ph 5-7 (20°) Presión de vapor 3.17 kPa(25°)

	Densidad relativa 0.98- 100° (20°) Peso molecular 18.015 g/mol (H₂O)
Estabilidad:	No se conoce reacciones peligrosas bajo condiciones de uso normal. El material es estable bajo condiciones ambientales normales y en condiciones previsibles de temperatura y presión durante su almacenamiento y manipulación. La polimerización peligrosa no ocurre.
Toxicología:	N/D
Eliminación:	Se debe evitar o minizar la generación de desechos cuando sea posible. No se deben utilizar los sistemas de alcantarillado de aguas residuales para deshacerse de cantidades significativas de desechos del producto, debiendo ser estos procesados en una planta de tratamiento de efluentes apropiada.
Regulaciones:	Reglamentos de seguridad, salud y medio ambiente específicas para el producto en cuestión México.

	Sustancias que están sujetas a ser reportadas en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes.
Otra información:	La información contenida está basada en el conocimiento y experiencia actuales.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Producto:	Reactivos para la prueba de DQO
Identificación y Emergencias:	Sustancia toxica para las personas en caso de inhalación, contacto con piel y ojos.
Peligros:	
Composición:	C6H12N4
Primeros auxilios:	Inhalación: Sacar al aire fresco Contacto cpon la piel: Lave la zona efectuando con agua abundante. Contacto con los ojos: Enjuagar inmediatamente con abundante agua y acuda al médico. Ingestión: Beba abundante agua, evitar vómitos.
Lucha contra incendios:	Riesgos específicos: El desarrollo de los gases de combustión o

	vapores peligrosos en caso de incendio son óxidos de azufre, los vapores de mercurio. El hidrógeno puede formar en contacto con metales en peligro de explosión.
Manejo y almacenamiento	Recoger con materiales absorbentes. Limpiar la zona afectada y eliminarlo de acuerdo a la reglamentación local. No verter en el alcantarillado, aguas superficiales o subterráneas. Neutralizar con solución de hidróxido de sodio diluido o arrojando sobre la arena, la cal o carbonato de sodio.
Protección personal:	Guantes de Goma o Plástico Antiparras Ropa de seguridad
Propiedades físicas y químicas:	Apariencia y olor: Líquido amarillo – naranja con sólidos insolubles, inodoro. Temperatura de descomposición: >338°C Densidad a 20°C

	Ph a 20°C: < 0.5 Solubilidad en agua: Soluble (desarrolla calor)
Estabilidad:	Estable en condiciones normales de presión y temperatura
Toxicología:	No existe información cuantitativa disponible de la toxicidad del producto.
Eliminación:	Disponer conforme a las regulaciones locales vigentes para este tipo de sustancia, no verter el producto por el desagüe
Regulaciones:	Normas internacionales aplicables: Directivas CE de la Unión Europea
Otra información:	La información contenida aquí se basa en datos considerados precisos.

