EVALUACIÓN AUTOLIMPIANTE EN SUPERFICIES RECUBIERTAS CON NANOPARTÍCULAS A BASE DE TIO_2/ZNO

Emilly Vitery Meneses.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química
Programa académico de Ingeniería Química
Santiago de Cali, 2026

EVALUACIÓN AUTOLIMPIANTE EN SUPERFICIES RECUBIERTAS CON NANOPARTÍCULAS A BASE DE TIO_2/ZNO

Emilly Vitery Meneses

Emilly.viterycorreounivalle.edu.co

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero químico

Director:

Ing. Rubén Camargo Amado, Ph.D.

Codirector:

Ing. Santiago Sinisterra Villota

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

Programa académico de Ingeniería Química

Santiago de Cali, 2026

DEDICATORIA.

A la Toya y a mi papito, desde el cielo,

A mi mamita, vida mía, por estar todos los días… literal.

A mi hermano, el motorcito que me impulsa cada mañana.

Y a la mishita, por salvarme y mantenerme con vida.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

A mi familia, por su amor incondicional, por estar presentes en los momentos difíciles y por brindarme siempre su apoyo, comprensión y confianza. A mis amigas, quienes, con su compañía, palabras de aliento y ayuda desinteresada hicieron este camino más llevadero y significativo.

A la Universidad del Valle, por brindarme la formación académica y el espacio para crecer como profesional y como persona. Agradezco especialmente al profesor Rubén Camargo, director de este trabajo, por su valiosa guía, disposición y por compartir sus conocimientos con paciencia y compromiso durante todo el proceso.

Y, por supuesto, a la mishita, por ser una compañera silenciosa pero constante, por estar a mi lado en las largas jornadas de estudio, por su compañía fiel y por regalarme tranquilidad y ternura incluso en los días más agotadores.

A todos los que, de alguna manera, estuvieron presentes en este camino: gracias por ser parte de esta etapa tan importante en mi vida.

RESUMEN.

En los últimos años, los nanomateriales semiconductores como el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO) han cobrado protagonismo por su capacidad fotocatalítica, especialmente bajo irradiación UV. Este proyecto se enfocó en la síntesis de pastillas compuestas por mezclas de TiO_2 y ZnO en distintas proporciones, con el objetivo de evaluar su eficacia en la degradación del colorante azul de metileno como contaminante modelo.

Las mezclas en polvo de TiO_2 y ZnO fueron sometidas a ensayos fotocatalíticos bajo condiciones controladas, y los resultados evidenciaron una actividad significativa en todas las formulaciones, destacándose ciertas proporciones por su mayor eficiencia. Estos resultados se tomaron como referencia para inferir el comportamiento potencial de las pastillas elaboradas con dichas composiciones. El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que tanto el tiempo de exposición como el tipo de mezcla influyen de forma significativa en la degradación del colorante. Asimismo, se identificó una interacción relevante entre ambos factores, lo que sugiere un efecto sinérgico.

Los hallazgos obtenidos confirman el potencial de estas formulaciones sólidas como agentes fotocatalíticos aplicables a superficies autolimpiantes y procesos de remediación ambiental, proponiendo una alternativa práctica y eficiente para la reducción de contaminantes orgánicos.

TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN. 10
2. OBJETIVOS. 12
   2.1 Objetivo general. 12
   2.2 Objetivos específicos. 12
3. MARCO TEÓRICO. 13
   3.1.1. Nanotecnología: Definición y Evolución. 13
   3.1.2 Nanomateriales. 14
   3.1.3. Aplicaciones de la nanotecnología en autolimpiantes. 15
   3.1.4. Fotocatálisis: Principios Generales. 17
   3.1.5. Óxido de Zinc (ZnO) como Fotocatalizador. 18
   3.1.6. Dióxido de Titanio (TiO_2) en Fotocatálisis. 19
   3.1.7. Fenómeno Fotoeléctrico y Band Gap 20
   3.2 MARCO CONCEPTUAL. 22
   3.2.1 Nanotecnología. 22
   3.2.2 Nanomaterial. 22
   3.2.3 Dióxido de titanio (TiO_2). 22
   3.2.4 Autolimpiante. 23
   3.2.5 Oxido de Zinc. 23
   3.2.6 Fotocatálisis. 23
   3.3 MARCO LEGAL. 24
   3.4 MARCO INSTITUCONAL. 25
4. ANTECEDENTES. 26
5. METODOLOGÍA. 30
   5.1. Pruebas Preliminares 30
   5.2. Etapa 1: Fabricación y Caracterización de la Superficie. 30
   5.3. Etapa 2. Evaluación actividad fotocatalítica/autolimpiante. 32
   5.4. Etapa 3. Recopilación de Datos y Análisis de resultados. 34
6. RESULTADOS. 35

6.1. Etapa 1. Fabricación y Caracterización de la Superficie 35
6.2. Etapa 2. Evaluación actividad fotocatalítica/autolimpiante. 37
6.3. Etapa 3. Recopilación de Datos y análisis de resultados 44
7. CONCLUSIONES. 47
8. ANEXOS. 49
ANEXO 1. Residuos ANOVA. 49
ANEXO 2. pruebas post-hoc de Tukey. 49
9. REFERENCIAS. 50

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Diseño experimental evaluación Actividad fotocatalítica. 33

Tabla 2. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones. 35

Tabla 3. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones (Segunda prueba)..... 36

Tabla 4. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones. (Tercer prueba)..... 37

Tabla 5. Resultados de la concentración de azul de metileno durante el proceso de fotodegradación. 38

Tabla 6. Eficiencia y cinética Metatitanato de Zinc..... 41

Tabla 7. Eficiencia y cinética Ortotitanato de Zinc..... 42

Tabla 8. Eficiencia y cinética Metatitanato Cúbico. 42

Tabla 9. Análisis de varianza..... 45

Tabla 10. Modelo estadístico..... 45

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Mecanismo catalítico por fotocatalizadores catiónicos y aniónicos (a) y mecanismo de foto degradación bajo la luz solar (b) en la superficie de nanopartículas de ZnO (AlMohamadi et al., 2024). 19

Figura 2. Patrones DRX de los fotocatalizadores sintetizados(Peñas-Garzón et al., 2023)..... 20

Figura 3. Degradación del contaminante en en tela de algodón recubierta de TiO_2 /ZnO/quitosano(Novra Gabriela et al., 2025). 28

Figura 6. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Metatitanato de Zinc. .. 38

Figura 7. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Ortotitonato de Zinc 39

Figura 8. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Metatitanato metaestable 39

1. INTRODUCCIÓN.

El progreso que ha experimentado la nanotecnología en los últimos tiempos ha sido impresionante, las nanopartículas metálicas han llamado poderosamente la atención. Este interés se debe a sus singulares propiedades fisicoquímicas (Rai, 2013). Gracias a estas características tan particulares, las nanopartículas se han revelado como opciones prometedoras para variadas aplicaciones, especialmente en la mejora y cuidado del medio ambiente (Navarro Espinoza et al., 2021). Entre los nanomateriales más examinados en este campo, el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO) resaltan por su eficacia como fotocatalizadores al contacto con la luz UV (Ali et al., 2021). Bajo estas circunstancias, ambos compuestos semiconductores generan especies reactivas de oxígeno (ROS), como los radicales hidroxilos (-OH) y los aniones superóxido (O_2^-), que son sumamente oxidantes, permitiéndoles así descomponer y quitar una extensa variedad de contaminantes orgánicos y microorganismos (Novra Gabriela et al., 2025).

Bajo este enfoque, la fotocatálisis heterogénea se ha establecido como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas(Mundo et al., 2015). Su potencial resulta crucial para la eliminación de tintes sintéticos, como el azul de metileno, frecuentes en los residuos de las industrias textil y farmacéutica (Bekbölet, 1997; Wist et al., 2002). La presencia de estas sustancias en las fuentes de agua supone un grave problema medioambiental, debido a su

toxicidad y su resistencia a la descomposición natural (Corzo Lucioni, 2005). Ante esta circunstancia, es indispensable hallar métodos eficientes para su eliminación. En este caso, es importante descubrir formas efectivas de deshacerse de él. No obstante, la efectividad de la fotocatálisis se basa en múltiples aspectos, incluido el tipo y la composición de la sustancia, su forma y disposición cristalina, las relaciones en mezclas con diferentes elementos (Wist et al., 2002).

En el presente estudio se valoró la actividad fotocatalítica de distintas mezclas de nanopartículas de TiO_2 y ZnO, creadas en diferentes proporciones. Estas mezclas se sintetizan en forma de pastillas. Se llevó a cabo una valoración de su rendimiento utilizando el azul de metileno como contaminante de prueba, asegurando así la igualdad en las condiciones experimentales y una comparación precisa de los resultados. Se realizaron experimentos controlados y la información recopilada se examinó estadísticamente para identificar la mejor combinación en función de su capacidad de degradación. El objetivo principal de esta investigación fue determinar la combinación y las condiciones idóneas para usar estos materiales como fotocatalizadores en procesos de descontaminación, ofreciendo de este modo una opción viable para el tratamiento de aguas residuales.

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo general.

Evaluar la eficiencia fotocatalítica y autolimpiante de pastillas elaboradas a partir de mezclas de TiO_2 y ZnO, mediante la determinación de la degradación del azul de metileno bajo irradiación UV.

2.2 Objetivos específicos.

- Fabricar pastillas compactas de TiO_2/ZnO empleando distintas proporciones de mezcla y aplicar un tratamiento térmico para favorecer la formación de fases fotocatalíticamente activas.
- Comparar el desempeño fotocatalítico de las distintas formulaciones para identificar la composición con mayor eficiencia autolimpiante.
- Aplicar análisis estadístico para evaluar el efecto del tiempo de irradiación y el tipo de pastilla sobre la degradación del contaminante.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1.1. Nanotecnología: Definición y Evolución.

La nanotecnología supone un avance de gran impacto en el mundo de la tecnología; se centra en la manipulación, el diseño y el análisis de materiales y estructuras a escala muy pequeña, concretamente entre 1 y 100 nanómetros (Nasrollahzadeh et al., 2019).

Esta tecnología ha cobrado una gran importancia en los últimos años debido a su capacidad para transformar sectores como la medicina, la electrónica, la energía, la agricultura y hasta la industria de los alimentos (Hulla et al., 2015a).

La idea inicial se le atribuye al físico teórico Richard Feynman, quien, en 1959, durante su charla “There's Plenty of Room at the Bottom", planteó la posibilidad de manipular y controlar los átomos uno a uno (Nasrollahzadeh et al., 2019). Las primeras ideas técnicas aparecieron en los años 60, cuando Marvin Minsky propuso la construcción de máquinas del tamaño de bacterias, utilizando técnicas de nanofabricación (Quintili, 2012). Más tarde, en los años 80, Eric Drexler propuso el concepto de ensamblador molecular, lo que daría lugar a una “revolución molecular” al permitir la creación de máquinas capaces de construir otras máquinas (Hulla et al., 2015b).

En las décadas de 1990 y 2000, se crearon nanopartículas y nanotubos de carbono, y se fabrican chips con muchos transistores, lo que abrió mucho el campo de la nanotecnología en la electrónica (Dai, 2002).

La nanotecnología ha avanzado muchísimo en los últimos años, generando importantes progresos en áreas clave como la medicina, con el desarrollo de biosensores; la industria alimentaria; y la electrónica (Mendoza & Luis Rodríguez-López, 2007). A pesar de su gran utilidad y de los logros alcanzados, la nanotecnología se enfrenta a un reto importante: reducir los posibles riesgos para la salud de las personas y el medio ambiente. Como respuesta a estas preocupaciones, han surgido nuevas disciplinas científicas, como la nanociencia (Mendoza & Luis Rodríguez-López, 2007).

A pesar de los retos normativos y científicos, el avance en este campo ha sido notable, y se espera que, con el desarrollo de nuevos modelos y métodos de evaluación, el futuro de la nanotecnología siga siendo prometedor y beneficioso para la sociedad (Amalio & Domingo, n.d.)

En definitiva, la nanotecnología es una herramienta potente para resolver problemas complejos mediante la manipulación precisa de la materia. Aun así, su avance debe ir de la mano de estudios éticos y de seguridad para evitar efectos negativos en la salud y el medio ambiente (Janett et al., 2015).

3.1.2 Nanomateriales.

Los nanomateriales son materiales cuya estructura tiene dimensiones que van de 1 a 100 nanómetros. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, presentan propiedades y aplicaciones excepcionales. Entre sus características más destacadas se encuentran los efectos cuánticos y una mayor superficie específica.

Además, muestran comportamientos distintos en sus propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas, térmicas y químicas (Asha & Narain, 2020; Lv et al., 2025).

Los tipos más comunes de nanomateriales son las nanopartículas, los nanotubos, nanoalambres, nanocompuestos y puntos cuánticos, cada uno posee características y propiedades únicas que hacen permite su adecuación en aplicaciones específica (Soto-Arteaga et al., 2023).

Los nanomateriales se pueden clasificar de varias maneras, según su dimensionalidad, se clasifican en dimensión cero, unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, según su tipo se clasifican en cuatro categorías: nanomateriales basados en carbono, nanomateriales de base inorgánica, nanopartículas de base orgánica y nanopartículas basadas en compuestos(Lv et al., 2025; Nacional de Verificación de Maquinaria -María José Quintana San José -Miren Agurtzane Zugasti Macazaga -María del Carmen Uribe Zallo -Begoña Uribe Ortega et al., n.d.).

3.1.3. Aplicaciones de la nanotecnología en autolimpiantes.

El dióxido de titanio (TiO_2) es el fotocatalizador más investigado y utilizado para aplicaciones en autolimpiantes debido a su alta eficiencia fotocatalítica, estabilidad química, no toxicidad y bajo costo, se utiliza en forma de nanopartículas, capas delgadas o tratamientos de superficie, siendo la fase anatasa la más usada y en un grado menor la fase Rutilo, debido a que son las más activas fotocataliticamente (Rodríguez-Alfaro et al., 2023).Sus aplicaciones se enfocan en materiales de construcción, como cemento, concreto, azulejos, vidrio, pinturas y recubrimientos

autolimpiantes para fachadas de edificios, un ejemplo es el uso del cemento activo TX el cual incorpora TiO2 para la descomposición de contaminantes atmosféricos y DIRT(Rodríguez-Alfaro et al., 2023).

De manera similar existen vidrios autolimpiantes que trabajan con TiO2 y al ser expuestos a luz solar descomponen la suciedad de estos (Wei et al., 2023a), en la industria textil el uso de estos nanomateriales permite la degradación de manchas y olores. Uno de los principales inconvenientes de trabajar con este compuesto es que su activación se da principalmente con luz UV, por tanto, se está buscando su uso con luz solar, donde se emplea dopajes con Nitrógeno, o metales nobles como la plata o el oro (Nisansala et al., 2021). Por su parte, el óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor con facultades fotocatalíticas y antibacterianas. Su forma de actuar es similar al TiO_2 y suele usarse con otros materiales. Con la ventaja de que no es tóxico al cuerpo y permite el pase de luz. Se usa en pinturas y cubiertas para obtener superficies autolimpiantes y evitar la proliferación y presencia de microbios, en telas para evitar bacterias, y en cremas y protectores solares, donde bloquea los rayos UV y elimina los microbios (Abou Zeid et al., 2024). La problemática del ZnO es que a veces su función fotocatalítica es menor que la del TiO_2 y su estabilidad en algunos lugares puede ser un problema. Por último, mezclar TiO_2 y ZnO en nanomateriales ha sido de gran estudio, al unir estos dos óxidos semiconductores, la función fotocatalítica mejora porque se separan mejor los electrones, lo que reduce la combinación y alarga la vida útil de las cargas, lo que genera una mayor capacidad de autolimpieza (Aplicaciones Industriales de La Nanotecnología Proyecto NANO-SME, n.d.).

3.1.4. Fotocatálisis: Principios Generales.

La fotocatálisis es un proceso catalítico impulsado por la luz, se utiliza para describir el cambio de velocidad de una reacción química en presencia de fotocatalizadores bajo irradiación de luz (Zhang et al., 2022), se clasifica en dos, fotocatálisis homogénea y fotocatálisis heterogénea, en la primera el catalizador se encuentra en estado electrónicamente fundamental, y en la segunda el fotocatalizador se encuentra en estado electrónicamente activo(Fernández Fassnacht Director General Daffny Rosado Moreno Secretario Académico Norma Patricia Muñoz Sevilla et al., n.d.).

Los principales procesos que tienen lugar en las reacciones fotocatalíticas son: la absorción del fotón (hv) para generar el par electrón-hueco (e^- -h+), la formación del par se dará si la energía del fotón incidente es superior a la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción del semiconductor, reacciones de oxidación y reducción producidas por los electrones y los huecos fotogenerados y reacciones de recombinación de cargas tanto en la superficie como en el seno de la partícula(Khan, 2023; Liu et al., 2023).

Entre los materiales más utilizados como fotocatalizadores se encuentran los semiconductores como el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO), los cuales destacan por su excelente capacidad de oxidación, banda prohibida directa y extensa en la región espectral cercana a UV, alta actividad fotocatalítica y alta energía de enlace(Fernández et al., n.d.), lo cual amplía sus aplicaciones en sistemas de tratamiento de aguas residuales, recubrimientos autolimpiantes,

sensores, y procesos de desinfección del aire. Gracias a sus características estructurales, pueden activarse tanto con luz ultravioleta como, en algunos casos modificados, con luz visible (Wist et al., 2002).

3.1.5. Óxido de Zinc (ZnO) como Fotocatalizador.

“El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor con un ancho de banda prohibida, así como una alta energía de enlace en condiciones ambientales”(Djuriić et al., 2010) , se utiliza como fotocatalizador debido a sus características principales, como son sus propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas, es amigable con el medio ambiente y su bajo costo(Pauporté, 2018).

La reacción fotocatalítica con ZnO inicia mediante la activación de este nanomaterial en presencia de luz, absorbe los fotones que tienen más energía que su banda prohibida (3,2 eV aprox.), lo que produce que un electrón salte de la banda de valencia a la banda de conducción dejando atrás un hueco positivo, formando un par electrón-hueco en la superficie del ZnO, posteriormente se da la formación de especies reactivas, el electrón reacciona con el Oxígeno formando radicales superóxido, mientras el hueco positivo reacciona ya sea con iones hidroxilo o con agua generando radicales hidroxilo, los radicales formados atacan las moléculas de contaminantes orgánicos, estos se descomponen en sustancias inocuas como dióxido de carbono, agua o ácidos inorgánicos(AlMohamadi et al., 2024).

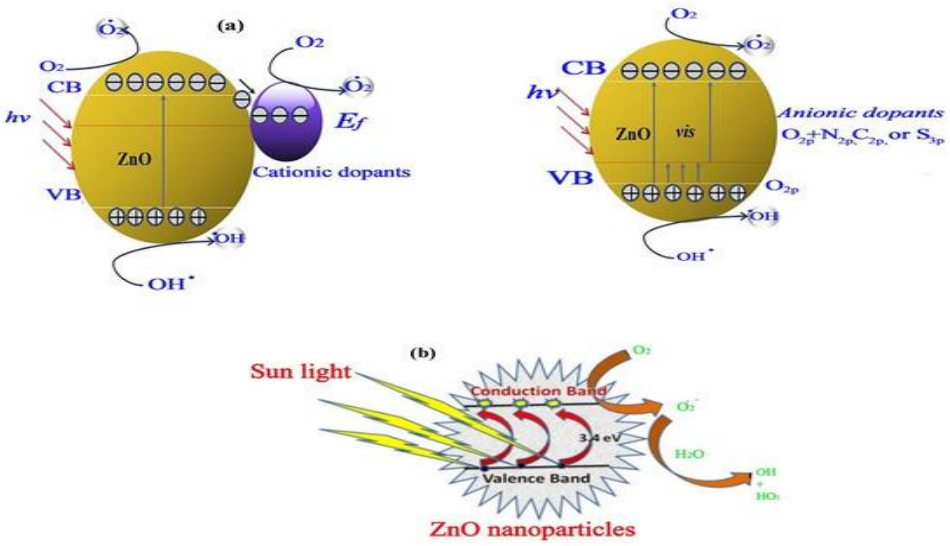


Figura 1. Mecanismo catalítico por fotocatalizadores catiónicos y aniónicos (a) y mecanismo de foto degradación bajo la luz solar (b) en la superficie de nanopartículas de ZnO (AlMohamadi et al., 2024).

3.1.6. Dióxido de Titanio (TiO_2) en Fotocatálisis.

El dióxido de titanio (TiO_2) es un semiconductor considerado como uno de los mejores fotocatalizadores debido a las ventajas que permiten sus propiedades fisicoquímicas, no es soluble en medio líquido, posee alta resistencia a la corrosión fotoquímica, el proceso de fotocatálisis se lleva a cabo a temperatura ambiente, es económico y puede rehusarse (Bekbölet, 1997). El TiO2 presenta tres fases cristalinas: anatasa, rutilo y brookita, generalmente se emplea el TiO2 en la fase anatasa debido a su mayor energía de banda que mejora la separación de cargas y la producción de radicales hidroxilo, en esta etapa se presenta una absorción de luz de 387 nm, a pesar de que el rutilo presenta una absorción de luz de 413 nm generalmente no se emplea debido a que tiene una menor capacidad reductora, así

mismo la brookita es poco usada debido a su difícil obtención aunque posee una mayor fotoactividad(Linsebigler et al., 1995; Ricci et al., 2013).

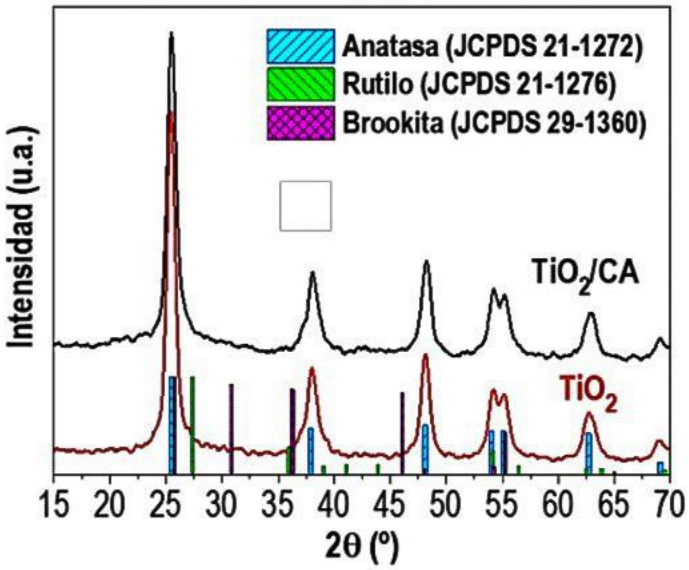


Figura 2. Patrones DRX de los fotocatalizadores sintetizados(Peñas-Garzón et al., 2023).

Una limitación importante del TiO_2 es que solo absorbe luz UV, lo que restringe su uso a una pequeña parte del espectro solar (3–5%) y obliga, en muchos casos, a usar lámparas UV, que requieren energía eléctrica adicional(De Mello Peters et al., 2018)

3.1.7. Fenómeno Fotoeléctrico y Band Gap

El fenómeno fotoeléctrico describe la interacción de la luz con la materia, donde la radiación electromagnética impacta la superficie de ciertos materiales fotosensibles provocando la emisión de electrones, este fenómeno fue explicado por Albert Einstein en 1905, por medio de la ecuación 1, nos dice que la energía cinética

máxima de los fotoelectrones es una función lineal de la frecuencia de la radiación incidentes(Reisin & Ferrara, n.d.).

$$E = hf - \phi. \quad Ecuación\ 1. modelo\ de\ Einstein$$

- E: Energía cinética máxima de los electrones expulsados
- h: Constante de Planck (6.626 x 10^{-34} J·s). Relaciona la energía de un fotón con su frecuencia.
- f: Frecuencia de la luz incidente
- ϕ: Función de trabajo: pérdida de energía por los electrones al escapar del metal.

Lo realmente notable es que la emisión de electrones no depende de lo brillante que sea la luz, sino de su frecuencia. Para que un electrón se libere, la luz debe tener una energía mínima suficiente, lo que nos dice que es la energía individual del fotón y no la cantidad de luz lo que impulsa el efecto. Esta energía mínima es conocida como función trabajo (Manuel et al., n.d.)

Este descubrimiento impulsó la creación y el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de convertir la luz en electricidad, como son las células solares y los sensores ópticos.

El band Gap o banda prohibida es un concepto clave en el estudio de los semiconductores, representa la diferencia energética entre la banda de valencia y la banda de conducción, donde para que se genere este movimiento es necesario que el fotón tenga una energía igual o superior al band gap, permitiendo así el flujo de corriente (Fouad et al., 2017; Núñez-González et al., 2008).

3.2 MARCO CONCEPTUAL.

3.2.1 Nanotecnología.

La nanotecnología es la ciencia de manipular la materia a una escala atómica y molecular para resolver problemas. Es una ciencia aplicada al desarrollo, con el potencial de hacer contribuciones significativas en la ingeniería, la informática y la medicina (Malik et al., 2023).

3.2.2 Nanomaterial.

En el diario oficial de la Unión Europea la Comisión Europea (2011) ha definido en su legislación un nanomaterial como:

Un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm (p.3).

3.2.3 Dióxido de titanio (TiO_2).

El TiO_2 es un compuesto que tiene tres estructuras principales: rutilo, anatasa y brookita; la estabilidad de estas estructuras depende del tamaño de partícula, rutilo es más estable para partículas de 35 nm, anatasa por debajo de 11nm y la brookita en un rango de 11 a 35 nm. En sus propiedades eléctricas se encuentra que la fase rutilo y anatasa en forma de polvo son semiconductores y la conductividad decrece con el incremento de la presión parcial de O_2 a temperaturas por encima de 600°C (Linsebigler et al., 1995; Ramírez, n.d.). Este semiconductor es sensible a la luz, ya

que absorbe radiación electromagnética cerca de la región ultravioleta visible (UV). En la literatura se le atribuye que, debido a sus propiedades eléctricas, el TiO_2 puede conferir la característica de superhidrofilicidad o superhidrofobicidad a diferentes materiales, generando superficies autolimpiantes y antiempañantes(Proyecto Final de Carrera Ingeniería de Materiales, n.d.).

3.2.4 Autolimpiante.

Una superficie autolimpiable es aquella que se mantiene limpia mediante fenómenos naturales y evita el trabajo manual, generalmente mediante fenómenos hidrofóbicos o hidrofílicos superficiales (Wei et al., 2023).

3.2.5 Oxido de Zinc.

El óxido de zinc (ZnO) es un material potencial para muchas aplicaciones, como sensores de gas, dispositivos emisores de luz de longitud de onda corta, láseres azules, recubrimientos conductores transparentes para paneles, celdas dispositivas o solares, ondas acústicas de superficie, etc. Además, este es un semiconductor (SC) que pertenece a un grupo de óxidos metálicos que se caracterizan por su capacidad foto catalítica y foto oxidante contra especies químicas y biológicas(Gallego et al., n.d.; Martínez-Pacheco et al., 2023).

3.2.6 Fotocatálisis.

La fotocatálisis es un proceso químico que implica el uso de la luz, generalmente luz solar o luz ultravioleta, para acelerar una reacción química en la presencia de un catalizador llamado fotocatalizador. En otras palabras, es la aceleración de una reacción química mediante la absorción de fotones de luz por un material específico

(el fotocatalizador), que luego activa una serie de reacciones en la superficie del material (Ralphs et al., 2025).

3.3 MARCO LEGAL.

Actualmente en Colombia no existe una ley específica que regule de manera integral la nanotecnología como campo autónomo, ni una normativa exclusiva que establezca disposiciones generales sobre la manipulación de nanomateriales en proyectos científicos y tecnológicos(Fernando et al., n.d.; *Ley_1286_2009*, n.d.).

Lo que implica que, si bien existen avances significativos en el desarrollo y la investigación en esta área, no existe un marco legal estructurado que garantice la seguridad, la ética y la sostenibilidad en el uso de la nanotecnología. Sin embargo, existen normas internacionales aplicables a superficies autolimpiantes basadas en fotocatálisis, que permiten orientar los ensayos y criterios de desempeño.

• ISO 27447:2009 — Método de prueba para actividad antibacteriana en materiales fotocatalíticos (COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT, 2009)

• ISO 22197-1:2016 — Métodos de prueba para desempeño fotocatalítico en purificación de aire (COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT, 2016)

• ISO 10678:2010 — Determinación de actividad fotocatalítica en medio acuoso mediante degradación de azul de metileno((E) PDF Disclaimer COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT, 2010)

Esta última norma respalda directamente el método utilizado en este proyecto.

3.4 MARCO INSTITUCONAL.

La presente investigación se lleva a cabo en las instalaciones de la Universidad del Valle, en las sedes Meléndez y San Fernando, en la Escuela de Ingeniería Química. Este trabajo se realizó en el laboratorio de docencia (LAPIC), el cual está completamente equipado para el desarrollo de experimentos y estudios, lo que permite asegurar la calidad y la validez de los resultados obtenidos durante el proceso de investigación.

Este proyecto se llevó a cabo de manera netamente académica, sin fines de lucro ni intereses económicos personales que puedan influir en el desarrollo de este. Es importante resaltar que no existe ningún tipo de conflicto de interés que comprometa la objetividad de la investigación. La investigación se realiza con el objetivo de contribuir al conocimiento científico en el área de la nanotecnología y su posible aplicación en diferentes sectores.

4. ANTECEDENTES.

Los antecedentes de esta investigación abordan estudios previos sobre la nanotecnología y su aplicación en diversas áreas del conocimiento, específicamente el estudio de superficies autolimpiantes usando óxidos semiconductores, debido a su capacidad para degradar contaminantes y mantener la limpieza mediante acción fotocatalítica combinada con propiedades hidrofílicas o hidrofóbicas(Jamil et al., 2017).

En el sector de la construcción, las fachadas de los edificios se encuentran expuestas a diferentes factores ambientales como lo son la humedad, radiación UV, variaciones de temperatura y los contaminantes del aire, lo que ocasiona deterioros en la superficie, afectando no solo la apariencia sino también la resistencia y el incremento en gastos de mantenimiento, teniendo en cuenta esto, la creación de superficies con capacidades autolimpiantes, utilizando materiales fotocatalíticos, se ha presentado como una opción prometedora para disminuir la acumulación de contaminantes y extender la durabilidad de los materiales de construcción.

En este contexto, en el 2025 se realizó un estudio en el que se emplearon recubrimientos compuestos por nanopartículas de TiO_2 y micropartículas de ZnO sobre sustratos cementicios para uso de fachadas, se emplearon dos tipos de recubrimientos: por pulverización y por inmersión; se evaluó el rendimiento de autolimpieza monitoreando la degradación del colorante rodamina B (RhB) bajo luz solar simulada, obteniendo resultados que demostraron que los recubrimientos fotocatalíticos mejoraron las propiedades de autolimpieza de las superficies manteniendo la estética original del sustrato(Pereira Lessa et al., 2025).

Este tema de estudio también se ha extendido en el desarrollo de textiles funcionales, buscando mejorar su resistencia a manchas y la eliminación de impurezas o contaminantes, debido a la alta actividad fotocatalítica del TiO_2 y ZnO, al incorporarse en las fibras textiles y tratarse bajo luz ultravioleta permiten la generación de especies reactivas capaces de degradar compuestos orgánicos presentes en manchas o colorantes, teniendo en cuenta esto, en el 2025 se realizó una investigación usando tejido de algodón recubierto con TiO_2 /ZnO/quitosano como autolimpiador, empelando distintas concentraciones, para esta prueba se empleó irradiación de lámparas UV con el fin de eliminar manchas en la ropa causadas por tintes, específicamente de azul de metileno, durante este proceso, se midió la eficacia de la limpieza monitorizando los cambios en la intensidad del color o la concentración del colorante restante en la superficie del tejido de algodón después de un tiempo determinado.

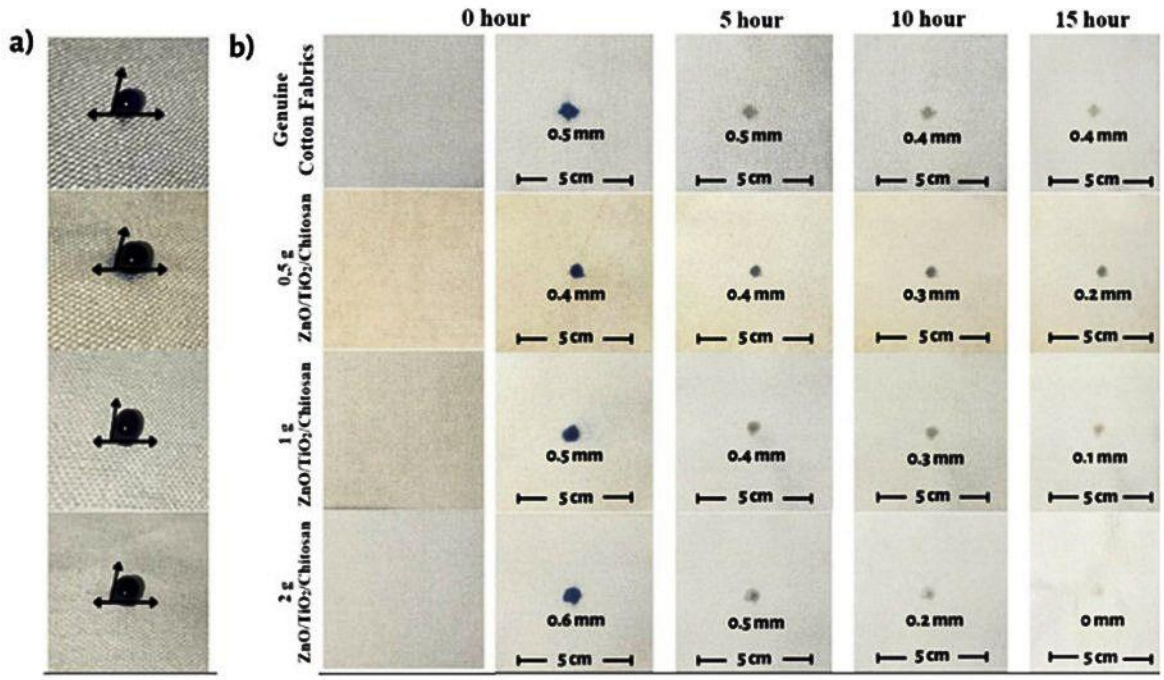


Figura 3. Degradación del contaminante en en tela de algodón recubierta de TiO_2 /ZnO/quitosano(Novra Gabriela et al., 2025).

Obteniendo los resultados observados en la figura 3, donde prácticamente se eliminó en su totalidad la mancha causada por el colorante(Novra Gabriela et al., 2025).

En Colombia el estudio, desarrollo y regulación de la nanotecnología se encuentra en una etapa inicial, en comparación con otros países que cuentan con un marco legal específico, esto plantea tanto oportunidades como desafíos(Monge Romero, 2020).

Esto limita el despliegue de su vasto potencial en áreas estratégicas como la salud y la industria. Es crucial que se actúe pronto, como ya lo han señalado estudios de COLCIENCIAS, para establecer una normativa que no solo impulse la investigación

en nanotecnología, sino que también proteja tanto a quienes la desarrollan como a la población en general de sus posibles riesgos.

5. METODOLOGÍA.

5.1. Pruebas Preliminares

Para las pruebas preliminares, se realizaron diversas preparaciones de las pastillas de TiO_2 y ZnO, variando tanto las proporciones de los compuestos como las temperaturas de preparación. Este proceso experimental se repitió hasta lograr identificar tres combinaciones de proporciones y una temperatura final que se consideraron las óptimas para continuar con el estudio final de este proyecto, esto también se determinó basándonos en la revisión de la literatura sobre estudios similares y sus resultados.

Con el objetivo de evaluar las propiedades autolimpiantes y fotocatalíticas de las superficies fabricadas con TiO_2/ZnO, se realizaron diversas actividades organizadas en tres etapas. A continuación, se describe detalladamente cada una de ellas:

5.2. Etapa 1: Fabricación y Caracterización de la Superficie.

Preparación de la Mezcla TiO_2 y ZnO:
En esta actividad se procede a la preparación de la mezcla de TiO_2 y ZnO según las proporciones establecidas en la literatura:

- **Proporciones**: Se preparan tres mezclas de TiO_2 y ZnO en las tres proporciones descritas anteriormente: 1:1(Metatitanato de Zinc), 2:1(Exceso de TiO_2), 2:3 (Ortotitonato de Zinc) para lo cual se utilizan balanzas de alta precisión.
- **Molienda**: Las mezclas de TiO_2 y ZnO se someten a un proceso de molienda para obtener una mayor homogeneización y reducir el tamaño de las

partículas, lo cual favorece la reactividad durante el posterior tratamiento térmico. Empleando bolas de zirconio (Zr) en una relación de 40:1 con la mezcla. Este proceso se lleva a cabo durante 30 minutos para asegurar una distribución uniforme de los polvos, esto considerando condiciones reportadas en la literatura para la preparación de mezclas de óxidos metálicos mediante molienda mecánica, las cuales permiten obtener una adecuada dispersión de los polvos sin generar contaminación o aglomeración excesiva de las partículas.

- **Formado de pastillas**: Después de la molienda, la mezcla se prensa en forma de pastillas. Para el prensado de pastillas de empleó un molde, vasos de precipitado, grafito, un motor reversible y una prensa de 12 toneladas , en el vaso de precipitado se pesaron 0,5 gr para cada pastilla, se lubricó con grafito el molde anteriormente lijado y se vertió la mezcla de manera uniforme, posterior a esto se llevó el molde a una prensa donde se sometió a una presión constante de 2 Tn durante 2 minutos, al mismo tiempo que se usaba un motor para sacar el aire que hubiese en la mezcla, finalmente se sacaba la pastilla del molde con mucho cuidado, cada pastilla tiene un peso de 0,5 gr y un diámetro de 2 cm aproximadamente.
- **Sinterización**: Las pastillas prensadas son llevadas a un proceso de sinterización en un horno tubular. La sinterización se lleva a cabo a una temperatura controlada que variará entre 400°C y 750°C. Este proceso dura 11 horas aproximadamente y es crucial para asegurar la fijación de las partículas y la mejora de las propiedades de la superficie. La temperatura debe ser cuidadosamente monitoreada y mantenida dentro del rango

deseado para evitar que el material se degrade o se obtenga una sinterización insuficiente.

5.3. Etapa 2. Evaluación actividad fotocatalítica/autolimpiante.

Se prepararon las muestras de TiO_2 y ZnO para realizar pruebas con el fin de evaluar sus propiedades fotocatalíticas, para este proceso se empleó como contaminante el azul de metileno, un colorante ampliamente utilizado en estudios de fotocatálisis debido a su estabilidad química, facilidad de detección espectrofotométrica y a que su degradación permite evaluar de manera confiable la actividad fotocatalítica de diferentes materiales; para llevar a cabo este estudio se realiza el análisis por espectrofotometría UV-Vis, técnica comúnmente empleada para cuantificar la disminución de la concentración del contaminante en función del tiempo.

Parámetros experimentales:

- Temperatura del medio (25°C ± 1°C)
- Tipo de contaminante (azul de metileno)
- Intensidad luz UV fuente de 18W
- Tiempo de contacto con la superficie (2-3h): intervalo suficiente para observar cambios significativos en la concentración del colorante durante el proceso de fotodegradación.

Factores:

- Mezcla TiO_2 y ZnO.
- Tiempo radiación UV (30 min, 60 min, 120 min).

Variable de respuesta:

- Cantidad de azul de metileno presente.

Con estos factores se plantea un diseño factorial 3x3:

Tabla 1. Diseño experimental evaluación Actividad fotocatalítica.

Tiempo radiación (h)	**Mezcla**		
1	Metatitanato de Zinc	Ortotitanato de Zinc	Metatitanato de la forma cúbica (meta estable)
1,5	Metatitanato de Zinc	Ortotitanato de Zinc	Metatitanato de la forma cúbica (meta estable)
2	Metatitanato de Zinc	Ortotitanato de Zinc	Metatitanato de la forma cúbica (meta estable)

Se lleva a cabo el cálculo de eficiencia de degradación teniendo en cuenta la ecuación 2.

$$Eficiencia\ (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0}\ x\ 100\ \ Ecuación\ 2. Cinética\ de\ degradación.$$

Donde;

C_0: Es la concentración inicial de azul de metileno.

C_t: Es la concentración remanente en el tiempo t.

Para la determinación de la cinética aparente se tiene en cuenta, La fotodegradación del azul de metileno suele seguir una cinética de pseudo-primer orden (Chen & Poon, 2009b), descrita por la ecuación 3:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = kt \ (Ecuación\ 3. Cinética\ de\ pseudo - prime\ orden)$$

Donde:

k: es la constante cinética aparente (min^{-1} o h^{-1})

t: es el tiempo de irradiación UV (min).

El valor de k se estima por regresión lineal.

5.4. Etapa 3. Recopilación de Datos y Análisis de resultados.

Los datos obtenidos del porcentaje de degradación fueron recopilados y organizados para su respectivo análisis estadístico, para esto se empleó el software MINITAB realizando un análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de determinar la significancia estadística de las diferencias observadas entre los tratamientos aplicados.

El análisis ANOVA permitió evaluar las interacciones entre los factores del diseño experimental (tiempo de exposición a UV, tipo de mezcla de TiO_2 y ZnO, etc.) y su impacto en actividad fotocatalítica y autolimpiante.

En esta etapa, los resultados obtenidos en la etapa 2 y 3 fueron analizados y comparados con los reportados en la literatura científica previamente revisada, con el propósito de identificar similitudes, diferencias y posibles explicaciones para el comportamiento observado en las muestras estudiadas.

Con el fin de facilitar la comprensión del procedimiento experimental, se presenta un diagrama de flujo que resume las principales etapas del proceso, desde la preparación de las mezclas de TiO_2 y ZnO hasta el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

6. RESULTADOS.

6.1. Etapa 1. Fabricación y Caracterización de la Superficie

Proporciones: con el objetivo de preparar las pastillas de la mezcla de TiO_2 y ZnO se establecieron tres proporciones diferentes, para estudiar sus propiedades, rendimiento y eficacia, se pesaron las cantidades usando una balanza analítica con una precisión de 0,001gr.

- Proporción 1:1(TiO_2: ZnO): 3,05 gr:3,05 gr
- Proporción 2:1(TiO_2: ZnO): 4,79gr: 3,05 gr
- Proporción 2:3(TiO_2: ZnO): 2,03 gr: 3,05 gr

Molienda: Se obtuvo una mezcla homogénea.

Prensado de pastillas: Durante el proceso de prensado se elaboraron inicialmente muestras para cada una de las proporciones evaluadas (1:1, 2:1 y 2:3), con el objetivo de obtener seis pastillas por cada proporción, para un total de 18 muestras. Durante esta etapa algunas pastillas se fracturaron, por lo que fue necesario repetir parcialmente el procedimiento hasta completar la cantidad objetivo. Los pesos correspondientes a las muestras obtenidas se presentan en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones.

	Peso (gr)					
Proporción	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**	**Muestra 6**
1:1	0,51	0,51	0,53	0,55	0,51	0,51
2:1	0,53	0,53	0,53	0,54	0,51	0,54
2:3	0,51	0,53	0,51	0,51	0,53	0,53

Tabla 3. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones (Segunda prueba).

	Peso (gr)					
Proporción	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**	**Muestra 6**
1:1	0,51	0,52	0,51	0,53	0,53	0,53
2:1	0,53	0,53	0,53			
2:3	0,53	0,52	0,51	0,53	0,5	0,53

Cocción de las pastillas: con el fin de obtener unas pastillas más consistentes y garantizar la eliminación de impurezas, después del prensado las pastillas se llevaron a un horno multipropósito-D8, como muestra la figura 4, este proceso se realizó en tres etapas, en la primer etapa se llevan las pastillas de una temperatura ambiente (25°C) a una temperatura de 400°C en un tiempo de 1h,20min, esta temperatura se mantiene constante por 1h,30min, en la segunda etapa se lleva la muestra a 750°C en un tiempo de 50 min y se mantiene esta temperatura constante por 3h,15 min, finalmente se enfría hasta 120°C proceso que lleva 2h,10min y se mantiene la temperatura constante por 1h,30 min, terminando el proceso de cocción.

En la figura 5 evidenciamos las pastillas después del tratamiento térmico.



Figura 4. Pastillas antes de cocción



Figura 5. Pastillas después de cocción

Durante el desarrollo experimental fue necesario preparar muestras adicionales para reponer algunas pastillas que se fracturaron durante la manipulación, obteniéndose finalmente un total de 39 pastillas, distribuidas en 13 muestras por cada proporción evaluada (tabla 4).

Tabla 4. Mezcla de TiO2/ZnO pesos y proporciones. (Tercer prueba).

	Peso (gr)								
Proporción	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**	**Muestra 6**	**Muestra 7**	**Muestra 8**	**Muestra 9**
1:01	0,53	0,53	0,52	0,53	0,53	0,55	0,54	0,55	0,52
2:01	0,53	0,53	0,53						
2:03	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53			

6.2. Etapa 2. Evaluación actividad fotocatalítica/autolimpiante.

Se prepararon soluciones de azul de metileno con un volumen de 0,054 L y una concentración inicial de 4000 ppm. A cada solución se adicionaron 200 mg de las mezclas de TiO_2 y ZnO correspondientes a: metatitanato de zinc, ortotitanato de zinc y metatitanato de zinc en fase cúbica metaestable.

Las mezclas se agitaron durante 30 min en oscuridad con el fin de favorecer el equilibrio de adsorción entre el colorante y el material fotocatalítico. Posteriormente, las muestras se expusieron a radiación UV, y se determinaron las concentraciones de azul de metileno en diferentes tiempos de irradiación: 1 h, 1,5 h y 2 h.

Tabla 5. Resultados de la concentración de azul de metileno durante el proceso de fotodegradación.

	Metatitanato de Zinc (mg/L)			**Ortotitanato de Zinc(mg/L)**			**Metatitanato de la forma cúbica (metaestable)(mg/L)**		
Tiempo (h)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1	4,194	3,885	4,636	5,561	2,4	4,536	0,369	2,569	2,048
1,5	3,33	1,66	4,229	5,346	1,04	3,845	0,385	2,249	1,431
2	2,254	1,76	2,359	2,19	0,61	2,887	0,377	1,441	1,7

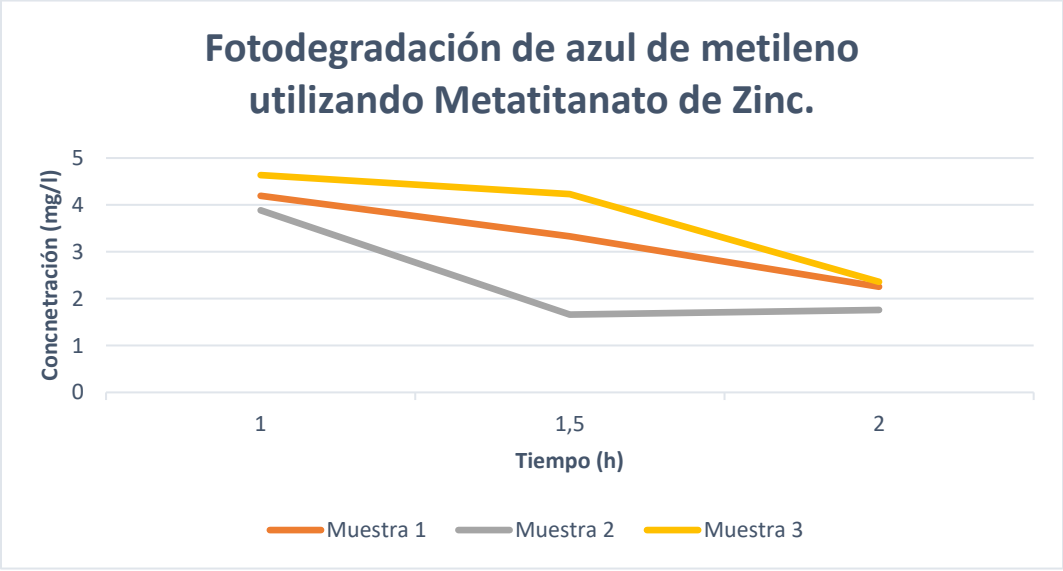


Figura 4. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Metatitanato de Zinc.

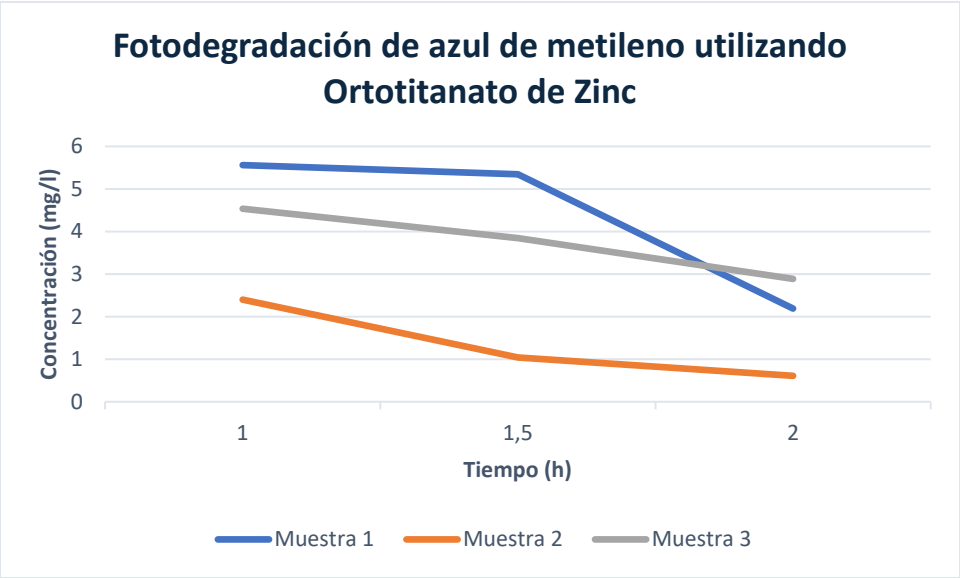


Figura 5. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Ortotitonato de Zinc

.

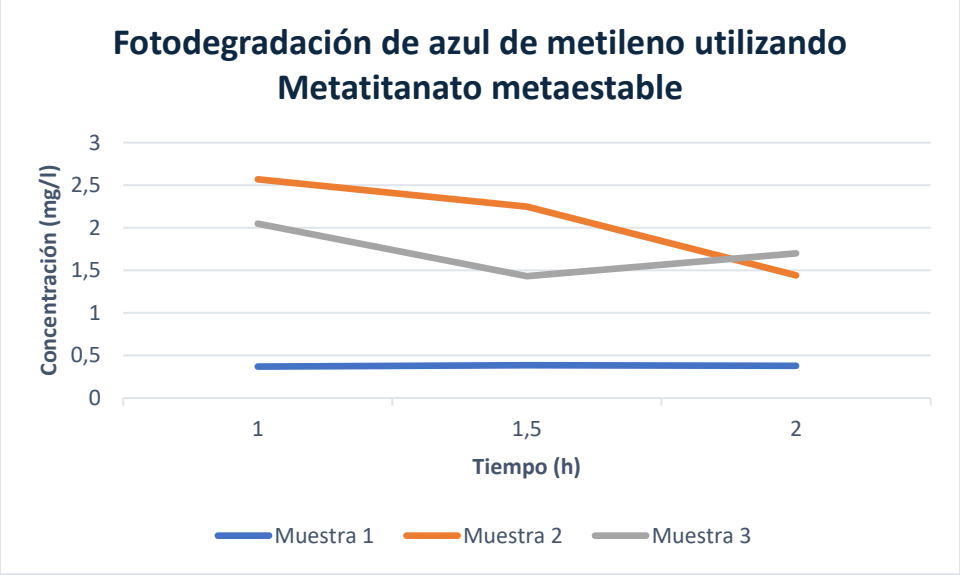


Figura 6. Fotodegradación de azul de metileno utilizando Metatitanato metaestable

En la gráfica 6. observamos una tendencia de disminución constante en la concentración de azul de metileno proporcional al aumento de tiempo de exposición de luz UV, obteniendo una degradación parcial, pero efectiva. La muestra 1 fue la

más eficiente debido a que logró una mayor reducción del azul de metileno, lo que sugiere una mayor eficiencia en la degradación fotocatalítica; este comportamiento puede estar relacionado con una mayor disponibilidad de sitios activos en la superficie del material o con una mejor interacción entre el catalizador y el colorante, Aunque la muestra 2 tuvo una degradación inicial más rápida, su actividad se estabilizó después del primer intervalo, lo que podría indicar una saturación parcial de los sitios activos o limitaciones en la transferencia de masa durante el proceso. La muestra 3 mostró una degradación intermedia.

En el caso de la fotodegradación del azul de metileno con ortotitanato de zinc (gráfica 7), se observa una mayor eficiencia fotocatalítica en comparación con el metatitanato de zinc, evidenciada por la reducción más notable en la concentración de azul de metileno. La muestra 2 logró una degradación casi completa del azul de metileno, pasando de 2,5 mg/l a menos de 0,5 mg/l, lo que indica una alta eficiencia en condiciones UV; Este comportamiento sugiere que la estructura del ortotitanato de zinc podría favorecer la generación de especies reactivas bajo irradiación UV, facilitando la degradación del colorante. La muestra 1 presentó una actividad fotocatalítica significativa, mientras la muestra 3 presentó un comportamiento más limitado y constante, lo que indica cierta variabilidad experimental entre las muestras.

A diferencia de los resultados anteriores, en la gráfica 8 observamos que este compuesto presentó una menor actividad fotocatalítica, la muestra 1 presentó un comportamiento constante durante los 3 tiempos, lo que indica una casi nula degradación, Aunque la muestra 2 fue la más activa de este grupo, la muestra 3 apenas mostró una variación clara. En resumen, estos resultados indican que esta forma cúbica metaestable del metatitanato no es un fotocatalizador UV eficiente.

Cálculos de eficiencia y cinética aparente: La eficiencia de degradación del azul de metileno y la cinética aparente del proceso fotocatalítico se evaluaron empleando las ecuaciones propuestas en la metodología, se tomó como referencia la concentración del colorante a 1 hora de irradiación, a partir de esto se calcularon:

Eficiencias de degradación entre 1 h a 1,5 h y 1 h a 2 h.

Constantes cinéticas aparentes k para cada intervalo de tiempo.

Obteniendo los resultados de las siguientes tablas:

Tabla 6. Eficiencia y cinética Metatitanato de Zinc

Muestra	**C(1h)**	**C (1.5h)**	**C(2h)**	**Efic. 1→1.5h (%)**	**Efic. 1→2h (%)**	**k (1→1.5h) h^{-1}**	**k (1→2h) h^{-1}**
1	4,194	3,33	2,254	20,6	46,26	0,461	0,621
2	3,885	1,66	1,76	57,27	54,7	1,701	0,792
3	4,636	4,229	2,359	8,78	49,13	0,184	0,621
Promedio				28,88	50,03	0,782	0,678

Tabla 7. Eficiencia y cinética Ortotitanato de Zinc.

Muestra	C(1h)	C (1.5h)	C(2h)	Efic. 1→1.5h (%)	Efic. 1→2h (%)	k (1→1.5h) h^{-1}	k (1→2h) h^{-1}
1	5,561	5,346	2,19	3,86	60,59	0,079	0,928
2	2,4	1,04	0,61	56,67	74,58	1,607	1,348
3	4,536	3,845	2,887	15,23	36,36	0,165	0,324
Promedio				25,25	57,17	0,617	0,867

Tabla 8. Eficiencia y cinética Metatitanato Cúbico.

Muestra	C(1h)	C (1.5h)	C(2h)	Efic. 1→1.5h (%)	Efic. 1→2h (%)	k (1→1.5h) h^{-1}	k (1→2h) h^{-1}
1	0,369	0,385	0,377	−4,34	−2,17	−0,085	−0,021
2	2,569	2,249	1,441	12,47	43,9	0,266	0,578
3	2,048	1,431	1,7	30,11	17,04	0,717	0,186
Promedio				12,75	19,59	0,299	0,248

Los cálculos sobre la eficiencia de degradación y la cinética aparente permitieron analizar cómo se comporta fotocatalíticamente cada uno de los materiales que se sintetizaron. Con las concentraciones obtenidas tras 1 h, 1,5 h y 2 h de irradiación UV, se aplicaron las ecuaciones de eficiencia y de pseudo-primer orden. Esto nos ayudó a cuantificar tanto el porcentaje de azul de metileno que se degradó como la velocidad a la que ocurrió este proceso. Los resultados obtenidos muestran un rango amplio de eficiencias de degradación entre aproximadamente 17 % y 75 % después de 2 horas de irradiación, así como constantes cinéticas aparentes que varían entre aproximadamente 0,18 y 1,35 h^{-1} entre las distintas réplicas y materiales evaluados, lo que está directamente relacionado con la estructura cristalina y el tipo de titanato que se formó durante la síntesis.

El ortotitanato de zinc demostró ser el material con el mejor rendimiento fotocatalítico entre todos los que se estudiaron. Este compuesto mostró las tasas

de degradación más altas y, al mismo tiempo, las constantes cinéticas aparentes más elevadas. En promedio, la degradación superó el 57 % después de 2 horas, con valores de k que rondan o superan 0,86 h^{-1}. Estos resultados sugieren que el ortotitanato no solo es capaz de degradar una mayor cantidad de colorante, sino que también lo hace a una velocidad más rápida. Esto indica que la estructura cristalina obtenida favorece la separación de cargas y la generación de especies reactivas durante la irradiación UV, lo que a su vez mejora la eficiencia del proceso fotocatalítico, sin embargo, se observa cierta variabilidad entre las réplicas, lo que indica que los valores promedio deben interpretarse como una tendencia general del comportamiento del material.

El metatitanato de zinc mostró un rendimiento intermedio. Aunque sus eficiencias finales de degradación alcanzaron cerca del 50 % y los valores de la constante cinética fueron moderados, su comportamiento fue más estable entre las réplicas. Este material demostró una actividad fotocatalítica adecuada, aunque no tan acelerada como la del ortotitanato. Esto podría estar relacionado con diferencias en la formación del óxido, la cristalinidad del material o la interacción entre el catalizador y el colorante.

Por otro lado, el metatitanato cúbico, que se encuentra en una fase metaestable, mostró las eficiencias más bajas y los valores más reducidos de la constante cinética aparente. En este caso, el porcentaje de degradación fue inferior al 20 % en un lapso de dos horas, y se notaron fluctuaciones en las mediciones, incluyendo momentos en los que la concentración aumentó ligeramente entre intervalos (lo que se conoce como eficiencias negativas). Los valores negativos pueden atribuirse a

variaciones experimentales asociadas a la medición espectrofotométrica, redisolución del colorante previamente adsorbido o a pequeñas fluctuaciones en sistemas con concentraciones relativamente bajas o incluso a características estructurales de esta fase que limitan su capacidad para generar radicales reactivos bajo irradiación UV.

6.3. Etapa 3. Recopilación de Datos y análisis de resultados

Se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores, donde se consideraron al tiempo de exposición y las distintas muestras como variables independientes, de igual manera se realizó el modelo estadístico para cuantificar la variabilidad, estos resultados se encuentran en la Tabla 7 y Tabla 8 respectivamente.

Los resultados del análisis de varianza (tabla 7) indican que tanto el tiempo de exposición como el tipo de muestra tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la degradación del azul de metileno, debido a que para ambos factores el Valor p es de 0,000, el cual es menor al umbral de significancia estadística de 0,05.

Tabla 9. Análisis de varianza

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados ajustada (Adj SS)	Cuadrado medio ajustado (Adj MS)	Valor F (F-Value)	Valor P (P-Value)
Tiempo de exposición (h)	2	11,904	5,9519	13,22	0,000
Tipo de muestra	8	41,219	5,1524	11,45	0,000
Error	16	7,202	0,4501		
Total	26	60,325			

Tabla 10. Modelo estadístico

Estadístico	Valor
Desviación Estándar (S)	0,670904
R^2	88,06
R^2 ajustado	80,6
R^2 predicho	66

La desviación estándar (S) de 0,670904 indica una dispersión relativamente baja de los datos alrededor de las predicciones del modelo, sugiriendo una buena precisión. Los valores de R^2(88,06%) indica un alto porcentaje de variabilidad total, el R^2 ajustado (80,6%) sugiere un ajuste sólido y el R^2 predicho (66%) evidencia una capacidad moderada de predicción para nuevos datos.

Para complementar el análisis estadístico se realizaron los gráficos de residuos (anexo 1) estos resultados nos confirman que los supuestos clave del modelo estadístico empleado (ANOVA) se cumplen de manera adecuada. Los residuos presentan una distribución aproximadamente normal, su varianza es constante y

son independientes. lo que sugiere que el modelo estadístico utilizado es apropiado y válido para realizar inferencias y extraer conclusiones significativas a partir de los datos, reforzando la fiabilidad de los resultados presentados en las Tablas 7 y 8.

Se realizaron las pruebas post-hoc de Tukey (Anexo 2) las cuales revelaron diferencias significativas entre las medias de los tiempos de las distintas muestras, las muestras 4, 6 y 3 se agruparon bajo la misma letra(A) representado que no existen diferencias significativas entre estas, la muestra 7 fue clasificada en el grupo D sola, lo que nos indica una diferencia significativa con el resto, las muestras 8 y 9 se agruparon en los grupos C y D con medias intermedias. Este análisis permite concluir que existen grupos de tratamientos con comportamientos fotocatalíticos significativamente distintos, lo que respalda los resultados obtenidos previamente en el análisis de varianza.

7. CONCLUSIONES.

Aunque los ensayos fotocatalíticos con azul de metileno se realizaron utilizando muestras en polvo de estas fases estructuradas, la composición química de las pastillas coincide con dichas proporciones, lo que permite establecer una relación directa entre el diseño estructural de las pastillas y el desempeño observado en las pruebas de degradación.

En este sentido, los resultados obtenidos con los compuestos en polvo sirven como referencia para validar el potencial de las pastillas como superficies autolimpiantes, y justifican su aplicación futura en condiciones similares.

Los ensayos de degradación de azul de metileno bajo irradiación UV evidenciaron actividad fotocatalítica en los materiales estudiados. La reducción progresiva de la concentración del colorante confirmó la capacidad de las mezclas TiO_2/ZnO para generar especies reactivas capaces de degradar compuestos orgánicos, lo que demuestra su potencial en aplicaciones de superficies autolimpiantes y procesos de remediación ambiental.

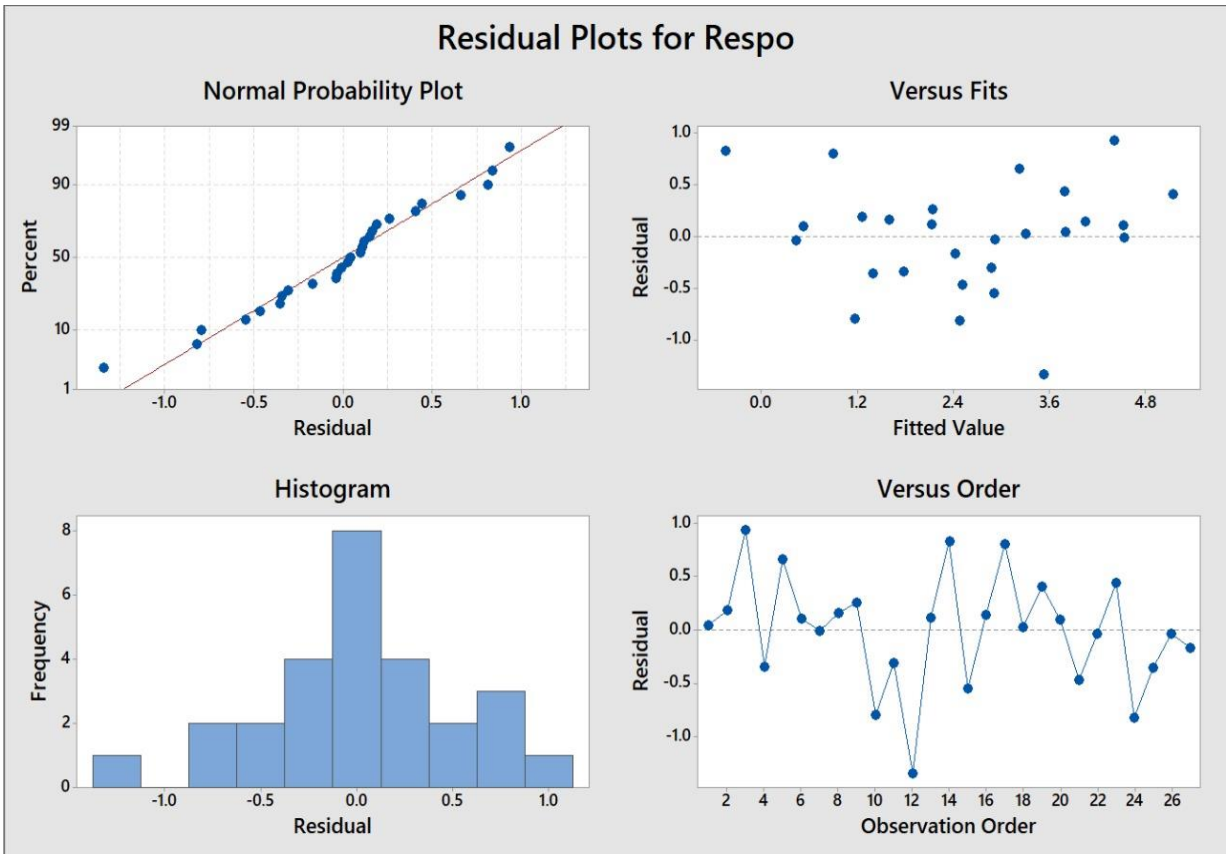
Al comparar el desempeño fotocatalítico de las diferentes formulaciones, el ortotitanato de zinc presentó la mayor eficiencia de degradación, alcanzando valores cercanos al 57 % después de 2 horas de irradiación UV, junto con las constantes cinéticas aparentes más altas. El metatitanato de zinc mostró un comportamiento intermedio con degradaciones cercanas al 50 %, mientras que el metatitanato cúbico metaestable presentó la menor actividad fotocatalítica, con degradaciones inferiores al 20 % en el mismo periodo de tiempo.

El estudio de varianza (ANOVA) ratificó que tanto que tanto el tiempo de irradiación como el tipo de muestra influyen de manera significativa en la degradación del azul de metileno ($p < 0,05$). Asimismo, se evidenció una interacción significativa entre el tipo de muestra y el tiempo de exposición, lo que sugiere que la eficiencia fotocatalítica depende no solo de cada factor por separado, sino de cómo interactúan entre sí.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la estructura cristalina del titanato formado a partir de las mezclas TiO_2/ZnO tiene un efecto directo en la actividad fotocatalítica, destacándose el ortotitanato de zinc como el material con mayor potencial para el desarrollo de superficies autolimpiantes basadas en sistemas fotocatalíticos.

8. ANEXOS.

ANEXO 1. *Residuos ANOVA.*



ANEXO 2. *pruebas post-hoc de Tukey.*

Tukey Simultaneous 95% CIs

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Respo, Term = M

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

M	N	Mean	Grouping
4	3	4.36567	A
6	3	3.75600	A B
3	3	3.74133	A B
1	3	3.25933	A B C
2	3	2.43500	A B C
8	3	2.08633	B C D
9	3	1.72633	C D
5	3	1.35000	C D
7	3	0.37700	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

9. REFERENCIAS.

Abou Zeid, S., Perez, A., Bastide, S., Le Pivert, M., Rossano, S., Remita, H., Hautière, N., & Leprince-Wang, Y. (2024). Antibacterial and Photocatalytic Properties of ZnO Nanostructure Decorated Coatings. *Coatings*, *14*(1). https://doi.org/10.3390/coatings14010041

AlMohamadi, H., Awad, S. A., Sharma, A. K., Fayzullaev, N., Távara-Aponte, A., Chiguala-Contreras, L., Amari, A., Rodriguez-Benites, C., Tahoon, M. A., & Esmaeili, H. (2024). Photocatalytic Activity of Metal- and Non-Metal-Anchored ZnO and TiO2 Nanocatalysts for Advanced Photocatalysis: Comparative Study. In *Catalysts* (Vol. 14, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/catal14070420

Amalio, P., & Domingo, S. (n.d.). *E.M. nº 12 Septiembre-Diciembre 2002 NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA: ASPECTOS GENERALES 1. INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ENTENDEMOS POR NANOTECNOLOGÍA Y NANOCIENCIA?*

Aplicaciones industriales de la nanotecnología Proyecto NANO-SME. (n.d.).

Asha, A. B., & Narain, R. (2020). Nanomaterials properties. *Polymer Science and Nanotechnology: Fundamentals and Applications*, 343–359. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00015-7

Bekbölet, M. (1997). Photocatalytic bactericidal activity of TiO2 in aqueous suspensions of E. coli. *Water Science and Technology*, *35*(11–12), 95–100. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00241-2

COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT. (2009).

COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT. (2016). www.iso.orgiTehSTANDARDPREVIEW

Corzo Lucioni, A. (2005). Revista De La Sociedad Qu?mica Del Per? *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, *77*(4), 267–274. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2011000400004&lng=es&nrm=iso&tlng=en

Dai, H. (2002). Carbon nanotubes: Opportunities and challenges. *Surface Science*, *500*(1–3), 218–241. https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01558-8

De Mello Peters, R. F., Dos Santos, P. A. M., Machado, T. C., Lopez, D. A. R., Machado, Ê. L., & De Assis Lawisch Rodriguez, A. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO2 supported in ceramic material. *Ecletica Quimica*, *43*(1), 26–32. https://doi.org/10.26850/1678-4618EQJ.V43.1.26-32

Djuriić, A. B., Ng, A. M. C., & Chen, X. Y. (2010). ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications. *Progress in Quantum Electronics*, *34*(4), 191–259. https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.04.001

(E) PDF disclaimer COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT. (2010).

Fernández Fassnacht Director General Daffny Rosado Moreno Secretario Académico Norma Patricia Muñoz Sevilla, E. J., Jorge Súchil Villegas, Ó., Silva Ruvalcaba, S., Campos López Abogada

General Jesús Ávila Galinzoga Presidente del Decanato Jorge Edgar Puga Álvarez, A., Rivas Mora, J., Antonio Ávila Reyes Director, J., Ángel Meré Rementería Subdirector Administrativo Néstor Naranjo Jiménez, A., Villanueva Gutiérrez, R., Martínez Espino, D., Elia Soto Pedroza, C., Edith Burciaga Siqueiros, M., Daniel Ríos García, V., Carolina Alanis Bañuelos, D., & Ma Clara Aguilar Reyes, D. (n.d.). *Directorio Instituto Politécnico Nacional Directorio del CIIDIR-IPN Unidad Durango "Vidsupra, visión científica."*

Fernández, M. B., Rodríguez, P., & Cantarell, M. (n.d.). *"Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía" Trabajo Fin de Grado*.

Fernando, L., Torres, P., General, V., Torres, A. V., Claudia, D., Forero, H., Vicerrector, F., Mg, A., Adolfo, G., Nahar, O., Jeaneth, D. M., Barragán, P., Arturo, C., & Sanabria, A. (n.d.). *Universidad Militar Nueva Granada*.

Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. S. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, 1499–1511. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141

Gallego, J. L., Roman, W. S., & Landázuri, H. R. (n.d.). Septiembre de 2008. *Scientia et Technica Año XIV*, *39*.

Hulla, J. E., Sahu, S. C., & Hayes, A. W. (2015a). Nanotechnology: History and future. In *Human and Experimental Toxicology* (Vol. 34, Number 12, pp. 1318–1321). SAGE Publications Ltd. https://doi.org/10.1177/0960327115603588

Hulla, J. E., Sahu, S. C., & Hayes, A. W. (2015b). Nanotechnology: History and future. In *Human and Experimental Toxicology* (Vol. 34, Number 12, pp. 1318–1321). SAGE Publications Ltd. https://doi.org/10.1177/0960327115603588

Jamil, W. J., Abdul Rahman, H., Shaari, S., & Salam, Z. (2017). Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 876–891. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.072

Janett, B., Gutiérrez, A., López Meléndez, A., Yazmin, C., Liñan, R., Abraham, D., & López, L. (2015). *La nanotecnología a 40 años de su aparición: Logros y tendencias: XVIII* (Number 66).

Khan, M. M. (2023). Fundamentals and principles of photocatalysis. *Theoretical Concepts of Photocatalysis*, 15–32. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95191-3.00008-0

ley_1286_2009. (n.d.).

Linsebigler, A. L., Lu, G., & Yates, J. T. (1995). Photocatalysis on TiO2 Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*, *95*(3), 735–758. https://doi.org/10.1021/CR00035A013

Liu, J., Zhang, S., Wang, W., & Zhang, H. (2023). Photoelectrocatalytic principles for meaningfully studying photocatalyst properties and photocatalysis processes: From fundamental theory to environmental applications. *Journal of Energy Chemistry*, *86*, 84–117. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.06.038

Lv, Q., Zheng, R., Abdollahi, H., Liu, Z., Xue, J., & Zhou, T. (2025). Nanomaterials-based Pickering foams: Stabilization, morphology, rheology, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103561. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2025.103561

Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry. In *Molecules* (Vol. 28, Number 2). MDPI. https://doi.org/10.3390/molecules28020661

Manuel, J., Ospina, C., Escobar, B., Juan, J., & Ramos, E. J. (n.d.). *EL EFECTO FOTOELÉCTRICO*.

Martínez-Pacheco, C., Del-Ángel-Meraz, E., & Díaz-Flores, L. L. (2023). Las nanoestructuras de ZnO y sus aplicaciones como sensor de gas H2S. *CienciaUAT*, 24–36. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v17i2.1632

Mendoza, G., & Luis Rodríguez-López, J. (2007). *Redalyc.La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso*.

Monge Romero, I. C. (2020). Principios para la supervisión y regulación de nanomateriales y nanotecnología: Proyecto de Iniciación Científica (PIC-CIAS-2911) - 2020. *Divulgación Científica y Cultural*. https://doi.org/10.18359/litgris.5074

Mundo, |, Artículos, N., Carlos Durán-Álvarez, J., Avella, E., & Zanella, R. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. In *www.mundonano.unam.mx* | (Vol. 8, Number 14). www.mundonano.unam.mx

Nacional de Verificación de Maquinaria -María José Quintana San José -Miren Agurtzane Zugasti Macazaga -María del Carmen Uribe Zallo -Begoña Uribe Ortega, C., Nacional de Nuevas Tecnologías -Virginia Gálvez Pérez -María Encarnación Sousa Rodríguez -María Teresa Sánchez Cabo -Mercedes Colorado Soriano -Josefa Aguilar Franco Colaboradores, C., & Méndez Zurutuza -Natividad Montes Beneitez -José Maria Rojo Aparicio -Antonia Hernández Castañeda -Silvia Torres Ruiz, -Rosa. (n.d.). *Elaborado por*. Retrieved http://publicacionesoficiales.boe.eshttp://www.insht.es/catalogopublicaciones/

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). An Introduction to Nanotechnology. *Interface Science and Technology*, *28*, 1–27. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8

Nisansala, H. M. D., Rajapaksha, G. K. M., Dikella, D. G. N. V, Dheerasinghe, M. J., Sirimuthu, N. M. S., & Patabendige, C. N. K. (2021). Zinc Oxide Nanostructures in the Textile Industry. *Indian Journal of Science and Technology*, *14*(46), 3370–3395. https://doi.org/10.17485/IJST/v14i46.1052

Novra Gabriela, R., Heryanto, H., & Tahir, D. (2025). Nanocomposite TiO2/ZnO/chitosan by method sol-gel for self-cleaning application. *International Journal of Biological Macromolecules*, *298*, 140076. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140076

Núñez-González, R., Reyes-Serrato, A., Posada-Amarillas, A., & Galván, D. H. (2008). *First-principles calculation of the band gap of Al x Ga 1−x N and In x Ga 1−x N* (Vol. 54, Number 2).

Pauporté, T. (2018). Synthesis of ZnO Nanostructures for Solar Cells-A Focus on Dye-Sensitized and Perovskite Solar Cells. *The Future of Semiconductor Oxides in Next-Generation Solar Cells*, 3–43. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811165-9.00001-6

Peñas-Garzón, M., Moreno-Medina, I., Bedia, J., & Belver, C. (2023). Síntesis y evaluación de fotocatalizadores TiO2/carbón activo: un enfoque multidisciplinar y cooperativo para estudiantes de ingeniería química. *Educación Química*, *34*(1), 128–155. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.1.82972

Pereira Lessa, F., Lima, O., Margalho, É., Pinheiro, C., Rocha Segundo, I., & Oliveira Carneiro, J. (2025). Application of nano-TiO2 and micro-ZnO on cementitious surfaces for self-cleaning façades by spray coating and dip coating: A comparative study. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *10*(1). https://doi.org/10.1007/s41024-024-00522-3

Proyecto Final de Carrera Ingeniería de Materiales. (n.d.).

Quintili, M. (2012). *Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño*.

Ralphs, K., Liu, J., Lan, L., Hardacre, C., Skillen, N., & Robertson, P. K. J. (2025). Photocatalytic valorisation of real-world substrates. *RSC Sustainability*, *3*(5), 2079–2110. https://doi.org/10.1039/D4SU00646A

Ramírez, A. M. (n.d.). *Fotocatálisis de TiO 2 para crear Materiales de Construcción más durables*.

Reisin, H. D., & Ferrara, S. J. (n.d.). *Efecto Fotoeléctrico*.

Ricci, P. C., Carbonaro, C. M., Stagi, L., Salis, M., Casu, A., Enzo, S., & Delogu, F. (2013). Anatase-to-rutile phase transition in TiO2 nanoparticles irradiated by visible light. *Journal of Physical Chemistry C*, *117*(15), 7850–7857. https://doi.org/10.1021/JP312325H

Rodríguez-Alfaro, L. F., Luévano Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2023). Nanopartículas de TiO2 fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción. ¡Construyamos edificios inteligentes! *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, *17*(32), 1e–39e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69737

Soto-Arteaga, C. E., Gutiérrez-López, E. D., Esqueda-Barrón, Y., & Díaz de León, J. N. (2023). Breve revisión sobre la síntesis de los nanomateriales más usados como soportes y catalizadores en diversas aplicaciones. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, *16*(31), 1e–24e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69777

Wei, Y., Wu, Q., Meng, H., Zhang, Y., & Cao, C. (2023a). Recent advances in photocatalytic self-cleaning performances of TiO2-based building materials. In *RSC Advances* (Vol. 13, Number 30, pp. 20584–20597). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d2ra07839b

Wei, Y., Wu, Q., Meng, H., Zhang, Y., & Cao, C. (2023b). Recent advances in photocatalytic self-cleaning performances of TiO2-based building materials. In *RSC Advances* (Vol. 13, Number 30, pp. 20584–20597). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d2ra07839b

Wist, J., Sanabria, J., Dierolf, C., Torres, W., & Pulgarin, C. (2002). Evaluation of photocatalytic disinfection of crude water for drinking-water production. *Journal of Photochemistry and*

Photobiology A: Chemistry, *147*(3), 241–246. https://doi.org/10.1016/S1010-6030(01)00615-3

Zhang, L., Kuang, P., & Yu, J. (2022). Introductory chapter: Fundamentals of photocatalysis and electrocatalysis. *Graphene Oxide-Metal Oxide and Other Graphene Oxide-Based Composites in Photocatalysis and Electrocatalysis*, 1–30. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824526-2.00001-5