

## AVANCES EN LA APLICACIÓN DE ÓXIDOS METÁLICOS COMO RECUBRIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS: UNA REVISIÓN

ADVANCES IN THE APPLICATION OF METAL OXIDES AS PHOTOCATALYTIC COATINGS: A REVIEW

JESÚS R. VILLARREAL-FLORES<sup>1</sup>

ANTONIA MARTÍNEZ-LUÉVANOS<sup>1</sup>

LORENA FARIÁS-CEPEDA<sup>1</sup>

LUIS ALFONSO GARCÍA-CERDA<sup>2</sup>

SOFÍA ESTRADA-FLORES<sup>2</sup>

### RESUMEN

La problemática de la contaminación hídrica constituye un desafío de gran magnitud en la actualidad. Entre los enfoques empleados para abordar esta problemática, destaca el empleo de la fotocatalisis como método de tratamiento de agua. No obstante, esta técnica presenta consideraciones que ameritan atención. Una de ellas es la implementación de un fotocatalizador en forma de partículas finas, lo cual conlleva a complicaciones en su recuperación eficiente. Otro aspecto limitante se relaciona con la capacidad de absorción de luz del fotocatalizador utilizado, la cual, generalmente está restringida al espectro no visible de la radiación electromagnética. Lo que lleva a considerar la alternativa de utilizar los óxidos metálicos en forma de recubrimientos, en lugar de polvos. Los métodos de recubrimiento son técnicas altamente versátiles que permiten aplicar capas protectoras o funcionales sobre una superficie, mejorando su rendimiento y durabilidad. En este trabajo se presenta cómo los recubrimientos fotocatalíticos superan las limitaciones de los materiales en polvo, ofreciendo una solución efectiva para diversos desafíos en la degradación de contaminantes. Además, se examinan algunos fotocatalizadores y los métodos actuales más utilizados para aplicarlos como recubrimientos.

Palabras clave: fotocatalisis; recubrimientos; óxidos metálicos.

1. Facultad de Ciencias Químicas, Unidad Saltillo, UAdeC.

2. Centro de Investigación en Química Aplicada.

Correspondencia  
s\_estrada@uadec.edu.mx  
ORCID: 0000-0003-4706-3984

Recepción de artículo  
21 de noviembre de 2023.

Artículo aceptado  
29 de mayo de 2024.



CienciAcierta

## ABSTRACT

*The problem of water pollution is a challenge of great magnitude today. Among the approaches used to address this problem, the use of photocatalysis as a treatment method stands out. However, this technique presents considerations that deserve attention. One of them is the use of a photocatalyst in the form of fine particles, which entails complications in its efficiency. Likewise, another limiting aspect is related to the absorption capacity of these photocatalyst, which is restricted to the non-visible spectrum of electromagnetic radiation. This leads to consider the alternative of using them in the form of coatings instead of powders. Coating methods are highly versatile techniques that allow protective or functional layers to be applied to a surface, thus improving its performance and durability. In this context, we will explore how photocatalytic coatings overcome the limitations of powdered materials, offering an effective solution to various challenges in contaminant degradation and other applications. In this review article, we will examine today's most used photocatalysts and coating methods, along with their key applications.*

*Keywords: photocatalyst; coatings; metal oxides.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el creciente problema de la contaminación agua y aire se vuelve cada vez más desafiante a causa de la mala gestión de recursos y la generación de grandes cantidades de residuos. Debido a esto, la academia enfoca sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos métodos para el tratamiento de aguas grises. Uno de estos métodos se encuentra en el uso de semiconductores como fotocatalizadores para la degradación de contaminantes orgánicos.

Los semiconductores son materiales con propiedades entre un aislante y un conductor, y son ampliamente utilizados, no solo en



aplicaciones medioambientales sino también en equipos optoelectrónicos, razón por la cual sus propiedades físicas y químicas deben ser cuidadosamente estudiadas y adecuadas, dependiendo del uso que se les pretende dar.

En cuanto a los semiconductores fotocatalíticos, se busca mejorar su rendimiento mediante diferentes técnicas como, por ejemplo, realizar recubrimientos sobre un sustrato para ser utilizado en el tratamiento de efluentes y que sea fácilmente recuperado.

A continuación, se presenta el concepto general de la fotocatalisis y se brinda una perspectiva de cómo los semiconductores pueden ser utilizados en forma de recubrimiento para degradar contaminantes en medios acuosos.

## 1. USO DE ÓXIDOS METÁLICOS SEMICONDUCTORES COMO FOTOCATALIZADORES

### 1.1. FOTOCATÁLISIS

La fotocatalisis es una técnica para el tratamiento de soluciones acuosas contaminadas con sustancias tóxicas que se basa en el uso de fotocatalizadores, materiales que, al absorber la luz solar, desencadenan reacciones químicas que descomponen los contaminantes presentes en el aire y el agua. Los fotocatalizadores son capaces de producir transformaciones de las especies químicas involucradas en una reacción en la presencia de luz, y se regeneran después de cada ciclo de interacciones (Braslavsky, 2007).

Esto se logra porque la absorción de luz excita a los electrones ( $e^-$ ) de la banda de valencia, produciendo un hueco ( $h^+$ ) en la misma banda y electrones pasan a la banda de conducción (Figura 1). Esta excitación energética pone en marcha inmediatamente reacciones de fotoreducción. Para que la fotocatalisis sea eficiente, es necesario que el contaminante y catalizador estén muy cerca o en contacto y que estén expuestos a una fuente de iluminación adecuada (Ibhadon y Fitzpatrick, 2013).

La fotocatalisis heterogénea es llamada así debido a que el fotocatalizador es un sólido semiconductor que actúa en la degrada-



ción de compuestos en solución, esta es una de las técnicas más versátiles para la remoción de una gran cantidad de contaminantes, incluyendo aquellos de origen biológico, orgánico e inorgánico. Además, su bajo costo y su capacidad para degradar una amplia gama de contaminantes hacen de ella una herramienta útil para la descontaminación de agua y aire en todo el mundo. Los fotocatalizadores ideales deberían ser fáciles de producir y usar, ser activados eficientemente por la luz solar y capaces de catalizar reacciones de manera eficiente y sin riesgos para el medio ambiente o los humanos (Carp, 2004).

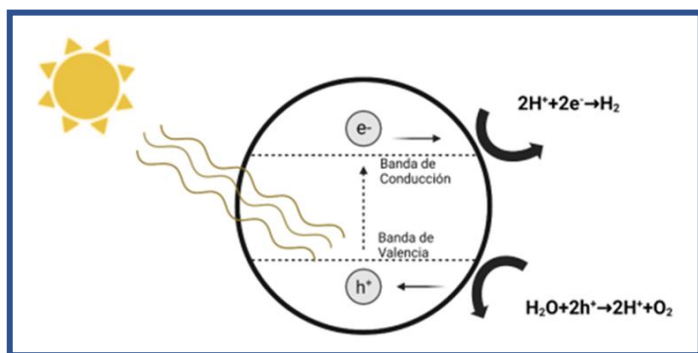


Figura 1. Esquema de la fotocatalisis heterogénea en un semiconductor. Creado en BioRender.com

## 1.2. PRINCIPALES FOTOCATALIZADORES

La mayoría de los estudios referentes a la evaluación de fotocatalizadores de la década pasada se centran en dos fotocatalizadores, el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ). Sin embargo, existen otros compuestos de interés que se han empleado con menor éxito, siendo más de 130 materiales inorgánicos y sus derivados los que han sido descubiertos como catalizadores empleados para distintos fines (Osterloh, 2008). En la Tabla 1 se muestran las características de algunos de los fotocatalizadores más empleados, así como el método para obtenerlos y sus principales aplicaciones.



Tabla 1.  
Óxidos metálicos más usados como fotocatalizadores.

Fotocatalizador	Métodos de síntesis	Características	Aplicación
<b>Dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)</b>	Sol-Gel, síntesis hidrotérmica	Inerte, estable, fácil de producir, de fácil manejo y sin riesgos para el medio ambiente	Sistemas de purificación de aire y agua, superficies autolimpiantes, esterilización, evolución de hidrógeno y conversión fotoelectroquímica.
<b>Óxido de zinc (ZnO)</b>	Sol-Gel, síntesis hidrotérmica, microemulsión	Fuerte poder de oxidación, bajo costo, no tóxico	Optoelectrónica, transistores de efecto de campo, celdas solares, dispositivos de fotoluminiscencia.
<b>Pentóxido de niobio (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	Pechini	Buena estabilidad química, no tóxico, alta disponibilidad	Celdas solares
<b>Dióxido de estaño (SnO<sub>2</sub>)</b>	Sol-Gel, precipitación homogénea	Bajo costo, alta estabilidad térmica, alta área superficial	Sensor de gas, purificación de agua
<b>El Óxido de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	Mecano-síntesis, Sol-Gel, síntesis hidrotérmica, condensación de fase de vapor	Alta absorción de luz, abundante, no tóxico	Aplicaciones biomédicas, fotodegradación, nanofibras

El TiO<sub>2</sub> es un polvo blanco que es utilizado como fotocatalizador y es el que se emplea en la mayoría de los estudios para la desintoxicación de agua residual. Esto se debe principalmente a que cumple con casi todas las características de un fotocatalizador ideal, es decir, es inerte, estable, fácil de producir, de fácil manejo y sin riesgos para el medio ambiente o para el usuario (Nakata y Fujishima, 2012). Una de sus desventajas es que no absorbe luz visible debido a su ancha brecha energética (band gap) (3.2 eV), lo que constituye entre el 3-4% de la luz solar que choca con la superficie de la Tierra (Yuan y col., 2019), y el hecho de que muestre una baja actividad fotocatalítica en la remoción de algunos contaminantes a muy bajas concentraciones, como por ejemplo los fenoles



producidos por las industrias de los plásticos, así como en la petrolera y los colorantes orgánicos. (Chen y col., 2020). Su baja actividad fotocatalítica es causada por su pequeña área superficial específica y baja habilidad de adsorción (Carp, 2004; Y. Zhang y col., 2011), razón por la cual este óxido se ha utilizado en conjunto con otros óxidos metálicos en forma de composito o heteroestructura (Estrada-Flores y col., 2023) o dopado con iones metálicos (Tian y col., 2024).

El ZnO es otro fotocatalizador popular para la fotodegradación de contaminantes debido a sus excelentes propiedades (Qi y col., 2017; Sharma y col., 2022), entre ellas su fuerte poder de oxidación, bajo costo y su no toxicidad. Comparado al TiO<sub>2</sub>, el ZnO puede exhibir un desempeño fotocatalítico aún mayor en la degradación de ciertos contaminantes orgánicos, como el fenol y sus derivados (Gouvêa y col., 2000; Li y col., 2008). Por otra parte, el ZnO presenta tres grandes desventajas. La primera es la fotocorrosión, en donde tanto los electrones como los huecos pueden participar en la descomposición del mismo semiconductor, (Kudo y Miseki, 2009; Weng y col., 2019), la segunda es su bajo rendimiento en presencia de luz solar debido a su ancha brecha energética (Ong y col., 2018) y finalmente su susceptibilidad de disolverse en pH extremos (Thampi y col., 1983; L. Zhang y col., 2009) lo que disminuye su aplicación fotocatalítica en solución acuosa.

El Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que es un óxido metálico semiconductor de transición tipo n comúnmente obtenido por el método Pechini (Taques Tractz y col., 2021). A pesar de ser poco utilizado, se presenta como una alternativa viable al TiO<sub>2</sub>, esto ya que son similares en su semiconductividad, tiene una buena estabilidad química y no es tóxico; generalmente se utiliza en la elaboración de paneles solares (Souza y col., 2016; Su y col., 2021).

El SnO<sub>2</sub> es un material semiconductor transparente que cuenta con una gran estabilidad química y mecánica. Este óxido posee una fase estable que se caracteriza por una estructura cristalina tetragonal, de tipo rutilo, la cual es denominada como casiterita (Do Nascimento y col., 2022; Montenegro Hernández y col., 2016), normalmente es sintetizado por los métodos sol-gel y precipitación homogénea.



Además de su empleo como fotocatalizador en la reducción de contaminantes, el óxido de estaño también despliega una aplicación significativa como sensor de gases. Este último papel se deriva de las alteraciones suscitadas en su superficie debido a la absorción química de moléculas gaseosas. En particular, el óxido de estaño se ha aplicado de manera extensiva para detectar gases como el monóxido de carbono (CO), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) y metanol (CH<sub>3</sub>OH) (Rella y col., 1997).

El Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es otro fotocatalizador que ha sido ampliamente estudiado, consiste en diferentes estructuras cristalinas, entre ellas el  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hitam y Jalil, 2020; Srivastava y col., 2010). Siendo el  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> el que más se ha probado como fotocatalizador, presenta una estrecha brecha energética (2.2 eV), una de las mayores ventajas que presenta frente a otros fotocatalizadores comunes es el hecho de que puede absorber luz de hasta 600 nm, aprovechando alrededor del 40% de la luz que golpea la superficie de la tierra (Zeng y col., 2015). Además, es muy abundante y no tóxico, sin embargo, no es eficiente para usos prácticos debido a su alto nivel de recombinación de huecos (h<sup>+</sup>) y electrones (e<sup>-</sup>) que limitan su eficiencia, así como su baja transferencia de carga (Hu y col., 2009).

Estos fotocatalizadores comparten la problemática de ser difícilmente recuperables cuando se emplean en el tratamiento de agua, pues suelen quedar esparcidos en el medio. Una alternativa para solucionar dicho problema es usarlos en forma de recubrimiento, ya que al ser adheridos a la superficie de un sustrato con buenas propiedades ópticas podrían ser utilizados con mayor eficiencia. Para esto, existen distintos métodos, los cuales se describen a continuación.

## 2. DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS Y TÉCNICAS DE APLICACIÓN

### 2.1. RECUBRIMIENTOS DE FOTOCATALIZADORES

Existen distintas técnicas o métodos por los cuales es posible recubrir un material empleado como sustrato. Cada cual cuenta con sus



propias ventajas y desventajas, como el costo, la homogeneidad de las capas, la capacidad para recubrir por ambas caras del sustrato, el tiempo que tardan y la adherencia que pueden dar. Los métodos que a continuación se exponen son algunos de los más empleados debido a su alta efectividad.

## 2.2. RECUBRIMIENTO POR INMERSIÓN

La técnica de recubrimiento por inmersión (dip – coating) consiste en una serie de pasos para lograr una adherencia del material del recubrimiento al sustrato. La técnica consiste en varios pasos, el primero es la inmersión del sustrato (vidrio con óxido de estaño (FTO)) en la solución que contiene el material del recubrimiento a una velocidad constante. Después de permanecer el sustrato dentro de la solución por un tiempo, se retira el sustrato a una velocidad constante, el cual contendrá una capa delgada de material. Finalmente, el exceso de líquido se drena del soporte y se evapora el solvente, formando una capa de recubrimiento sobre el sustrato (ver Figura 2). Una de las principales ventajas del método es que con él es posible producir recubrimientos sobre sustratos de múltiples composiciones y complejidad en cuanto a estructura. Las propiedades y el espesor de la capa dependen de una serie de factores, como el tiempo de inmersión, velocidad de extracción, número de inmersiones ciclos, composición de la solución, concentración y temperatura, humedad ambiental, entre otros (Lončarević y Čupić, 2019).

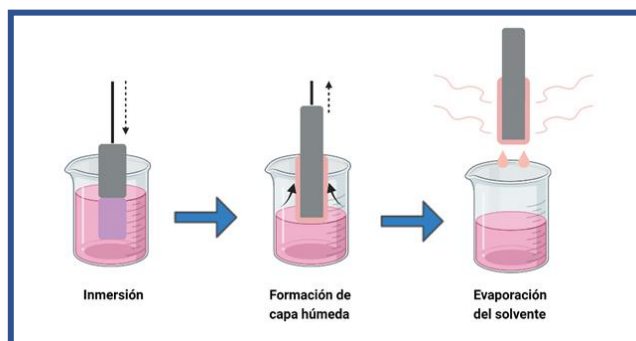


Figura 2. Esquema del procedimiento del recubrimiento por inmersión.

### 2.3. RECUBRIMIENTO POR ROTACIÓN

El recubrimiento por rotación (spin – coating) consiste en depositar una pequeña cantidad de una solución que se desea adherir en el centro de la superficie de un sustrato plano. Dicho sustrato se rota a alta velocidad (aprox. 3000 rpm) hasta que la solución se distribuya uniformemente en la superficie. Al igual que el recubrimiento por inmersión, el recubrimiento por rotación se utiliza para la fabricación de películas delgadas de recubrimientos uniformes de materiales sobre superficies planas. Siendo entonces los pasos: deposición, centrifugado hacia arriba y hacia fuera, y evaporación, como se muestra en la Figura 3 (Yilbas y col., 2019).

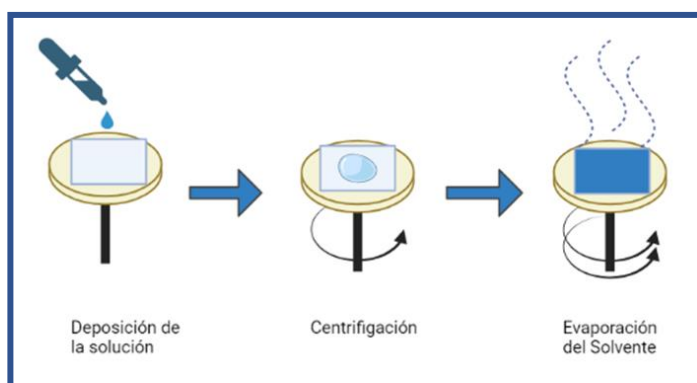


Figura 3. Esquema del procedimiento de recubrimiento por rotación, creado en BioRender.com

### 2.4. RECUBRIMIENTO POR MÉTODO DOCTOR BLADE

Uno de los métodos más comunes empleados para lograr capas de grosor bien definido es el método Doctor Blade. Este enfoque sobresale por su alta precisión. Su metodología se muestra en la Figura 4 la cual, implica situar una cuchilla afilada a una distancia determinada sobre el material que se pretende recubrir. La solución que se aplicará se coloca frente a esta cuchilla y, al moverse sobre el material, se distribuye uniformemente. Sin embargo, una de las limitaciones principales es que se requiere tiempo para encontrar las condiciones óptimas para cada experimento, buscando que esta búsqueda no conlleve una pérdida de solución superior al 5% (Cherrington y Liang, 2016). La separación entre la cuchilla puede ser modificada mediante soportes de alta precisión en un rango de



+/- 10  $\mu\text{m}$ . El depósito que contiene la solución para el recubrimiento puede llenarse mediante una bomba continua para prevenir la formación de burbujas en el depósito. El proceso de Doctor Blade puede operar a velocidades de hasta varios metros por minuto y es adecuado para aplicar recubrimientos de película húmeda de grosores que pueden ir desde los 20  $\mu\text{m}$  (Berni y col., 2004).

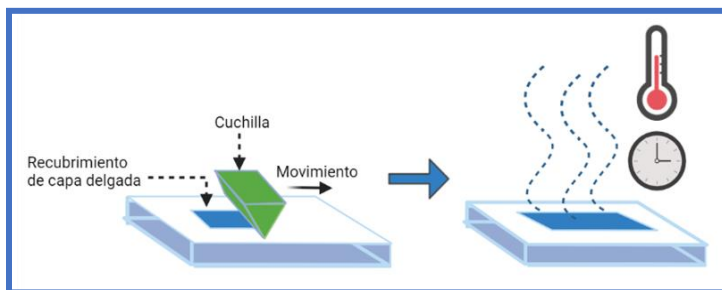


Figura 4. Esquema del recubrimiento por el método Doctor Blade. Creado en Biernder.com

### 3. AVANCES EN LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS CON $\text{TiO}_2$ Y $\text{ZnO}$

El  $\text{TiO}_2$  y el  $\text{ZnO}$  son los dos principales fotocatalizadores utilizados para fines medioambientales; en esta sección se abordarán los avances recientes en la aplicación de recubrimientos de estos óxidos, así como las posibles aplicaciones de estos.

Sonawane y colaboradores depositaron películas delgadas de  $\text{TiO}_2$  en distintos tipos de sustratos mediante la técnica de recubrimiento por inmersión. Los sustratos fueron recubiertos con una solución precursora de  $\text{Ti}(\text{O}_2)_2$  de viscosidad controlada con una velocidad de 1 mm/s, y las secaron al aire, posteriormente las calentaron a 400  $^\circ\text{C}$  para obtener películas uniformes con buena adhesión al sustrato. Las películas de  $\text{TiO}_2$  depositadas por esta técnica tenían un grosor de 20-100 nm con un tamaño de partícula de 4-10 nm y estructura de anatasa. Estas películas mostraron una alta actividad fotocatalítica para la descomposición de ácido salicílico y azul de metileno. Este método resulta efectivo para el depósito de películas delgadas de  $\text{TiO}_2$  en diversos sustratos como placas de vidrio, placas de sílice, placas de acero inoxidable y hélices de vidrio. Las películas que



obtuvieron fueron transparentes, homogéneas y uniformes, y mostraron una excelente adherencia a todos los sustratos; además encontraron que el grosor de la película depende de la concentración de titanio y la viscosidad del sol (Sonawane y col., 2003).

Por otra parte, también se ha reportado la formación de películas de ZnO por el método sol-gel y la técnica de recubrimiento por inmersión sobre sustratos de vidrio. Wojtasik y colaboradores analizaron el impacto de la duración del envejecimiento (64 días) del sol en las propiedades de las películas de ZnO. Estos estudios revelaron que las propiedades fisicoquímicas de las capas varían según la duración del envejecimiento. Las capas envejecidas por más de 30 días mostraron la mayor actividad fotocatalítica y porosidad, con un ángulo de contacto de agua máximo de  $68.53^\circ$ . Estas capas de ZnO, por su destacada actividad fotocatalítica, podrían tener aplicaciones en la protección medioambiental para la degradación de contaminantes orgánicos (Wojtasik y col., 2023).

Por otro lado, se desarrolló un novedoso recubrimiento de  $TiO_2$  sobre concreto, el cual tiene capacidad de autolimpiarse, esto para combatir los impactos nocivos de la contaminación del aire sobre el concreto. El revestimiento no sólo protege los materiales de construcción del deterioro, sino que también promete mitigar los problemas de salud relacionados con la contaminación. El estudio se centró en la síntesis de fotocatalizadores mesoporosos de  $TiO_2/SiO_2$ , diseñados para uso en exteriores, y su aplicación a superficies de concreto. Estos recubrimientos exhibieron una fuerte actividad fotocatalítica, que mejoró a medida que aumentó la concentración de  $TiO_2$ . En consecuencia, los recubrimientos eliminaron eficazmente contaminantes como el azul de metileno (MB) y el hollín, al tiempo que redujeron los óxidos de nitrógeno. En comparación, un fotocatalizador comercial mostró un rendimiento inferior, lo que provocó superficies agrietadas y una menor degradación de los contaminantes. Es importante destacar que los recubrimientos de  $TiO_2/SiO_2$  demostraron una eficacia duradera incluso después de la exposición a condiciones del mundo real. Esta



durabilidad se confirmó mediante pruebas en interiores y exteriores, que revelaron sólo una degradación mínima en su eficiencia fotocatalítica. Los resultados del estudio afirman la confiabilidad y eficacia de los recubrimientos para abordar los problemas de contaminación del aire (Khannyra y col., 2022).

Para abordar la urgente necesidad de desinfectantes para espacios de trabajo a causa de la pandemia de SARS-CoV-2, un grupo de investigadores probaron el uso de recubrimientos fotocatalizadores de  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$ , conocidos por sus propiedades purificadoras y antibacterianas. Estos recubrimientos se probaron contra SARS-CoV-2, el virus de la influenza, acetaldehído y formaldehído. Los resultados mostraron que los recubrimientos de  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$  tenían una alta actividad fotocatalítica y lograron inactivar eficazmente el virus de la influenza y el SARS-CoV-2. La fabricación de los recubrimientos involucró el uso de una técnica de recubrimiento mecánico (MCT) y tratamiento térmico. La caracterización de los recubrimientos se realizó mediante difracción de rayos X (XRD), lo que reveló la estructura cristalina del  $\text{TiO}_2$  fase anatasa. Además de la inactivación viral, los recubrimientos también demostraron eficacia en la purificación del aire, especialmente en la eliminación de acetaldehído y formaldehído. Estos resultados sugieren que los recubrimientos de  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$  tienen un gran potencial como herramientas efectivas para abordar la inactivación viral y la purificación ambiental (Lu y col., 2022).

Cabe destacar que el  $\text{ZnO}$  y el  $\text{TiO}_2$  también son comúnmente utilizados en conjunto con otros óxidos, esto para mejorar sus propiedades ópticas. Koysuren y colaboradores realizaron recubrimientos sobre vidrio de  $\text{ZnO}$  combinado con  $\text{WO}_3$  y  $\text{SiO}_2$ , obteniendo como resultado recubrimientos capaces de absorber luz en la región visible y ultravioleta del espectro electromagnético (Koysuren y col., 2024).

También es común encontrar composites con metales, por ejemplo, Sajjadnejad y colaboradores realizaron recubrimientos con composites de  $\text{Zn} - \text{TiO}_2$ . La presencia del  $\text{TiO}_2$  logró un cambio en la forma del crecimiento de los cristales sobre el sustrato, así mismo, ellos



encontraron una disminución en el tamaño de cristalita provocado por el aumento en la cantidad de  $\text{TiO}_2$ . Estos recubrimientos fueron realizados mediante electrodeposición y también encontraron que al aumentar la densidad de corriente en la deposición se obtenían cristales más pequeños sobre el sustrato (Sajjadnejad y col., 2024).

## CONCLUSIONES

La alternativa de usar los fotocatalizadores en forma de recubrimiento y no como polvo, presenta muchas ventajas, entre ellas siendo quizá la más importante el hecho de la fácil recuperación de los óxidos metálicos empleados para degradar los contaminantes orgánicos. Por mucho, el fotocatalizador más empleado es el  $\text{TiO}_2$ , el cual, si es sensibilizado o utilizado como composito presenta una alta eficiencia de degradación y un bajo costo. Por otra parte, los métodos usados para la aplicación de recubrimientos dip y spin – coating suelen ser los más empleados para aplicar recubrimientos sobre sustratos a nivel laboratorio, ya que presentan un bajo costo y son pocas las variables que se deben controlar para obtener recubrimientos homogéneos.

## AGRADECIMIENTOS

Jesús Ricardo Villarreal agradece al CONHACYT por la beca No. 813036 para realizar sus estudios de posgrado.

## REFERENCIAS

Braslavsky, S. E. (2007). Glossary of terms used in photochemistry, 3rd edition (IUPAC Recommendations 2006). *Pure and Applied Chemistry*. 79(3): 293-465. <https://doi.org/10.1351/pac200779030293>



- Carp, O. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress in Solid State Chemistry*. 32(1-2): 33-177. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2004.08.001>
- Chen, D., Cheng, Y., Zhou, N., Chen, P., Wang, Y., Li, K., Huo, S., Cheng, P., Peng, P., Zhang, R., Wang, L., Liu, H., Liu, Y., & Ruan, R. (2020). Photocatalytic degradation of organic pollutants using TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts: A review. *Journal of Cleaner Production*. 268: 121725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121725>
- Cherrington, R., & Liang, J. (2016). Materials and Deposition Processes for Multifunctionality. En V. Goodship, B. Middleton & R. Cherrington (Eds.), *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality* (pp. 19-51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-34061-8.00002-8>
- Do Nascimento, J. L. A., Chantelle, L., Dos Santos, I. M. G., Menezes De Oliveira, A. L., & Alves, M. C. F. (2022). The Influence of Synthesis Methods and Experimental Conditions on the Photocatalytic Properties of SnO<sub>2</sub>: A Review. *Catalysts*. 12(4): 428. <https://doi.org/10.3390/catal12040428>
- Estrada-Flores, S., Martínez-Luévanos A., Aguilera-González, E.N. (2023). Obtención del compuesto TiO<sub>2</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por mecanosíntesis y su uso en la fotodegradación de azul de metileno y diclofenaco con luz solar. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*. 10: 83-91. <https://doi.org/10.29057/aactm.v10i10.11422>
- Gouvêa, C. A. K., Wypych, F., Moraes, S. G., Durán, N., Nagata, N., & Peralta-Zamora, P. (2000). Semiconductor-assisted photocatalytic degradation of reactive dyes in aqueous solution. *Chemosphere*. 40(4): 433-440. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00313-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00313-6)
- Hitam, C. N. C., & Jalil, A. A. (2020). A review on exploration of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photocatalyst towards degradation of dyes and organic contaminants. *Journal of Environmental Management*. 258: 110050. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110050>
- Hu, Y.-S., Kleiman-Shwarsstein, A., Stucky, G. D., & McFarland, E. W. (2009). Improved photoelectrochemical performance of Ti-doped α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films by surface modification with fluoride. *Chemical Communications*. 19: 2652. <https://doi.org/10.1039/b901135h>

- Ibhadon, A., & Fitzpatrick, P. (2013). Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Applications. *Catalysts*. 3(1): 189-218. <https://doi.org/10.3390/catal3010189>
- Khannyra, S., Luna, M., Gil, M. L. A., Addou, M., & Mosquera, M. J. (2022). Self-cleaning durability assessment of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> photocatalysts coated concrete: Effect of indoor and outdoor conditions on the photocatalytic activity. *Building and Environment*. 211: 108743. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108743>
- Koysuren, O., Dhoska, K., Koysuren, H.N., Markja, I., Yaglikci, S., Tuncel, B., Bebi, E. (2024). SiO<sub>2</sub>/WO<sub>3</sub>/ZnO based self-cleaning coatings for solar cells. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 110: 183-203. <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06351-7>
- Kudo, A., & Miseki, Y. (2009). Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem. Soc. Rev.* 38(1): 253-278. <https://doi.org/10.1039/B800489G>
- Li, S., Ma, Z., Zhang, J., Wu, Y., & Gong, Y. (2008). A comparative study of photocatalytic degradation of phenol of TiO<sub>2</sub> and ZnO in the presence of manganese dioxides. *Catalysis Today*. 139(1-2): 109-112. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.012>
- Lončarević, D., & Čupić, Ž. (2019). The perspective of using nanocatalysts in the environmental requirements and energy needs of industry. En S. Thomas, Y. Grohens & Y.B. Pottathara (Eds.), *Industrial Applications of Nanomaterials, a volume in micro and nanotechnologies* (pp. 91-122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815749-7.00004-9>
- Lu, Y., Guan, S., Hao, L., Yoshida, H., Nakada, S., Takisawa, T., & Itoi, T. (2022). Inactivation of SARS-CoV-2 and photocatalytic degradation by TiO<sub>2</sub> photocatalyst coatings. *Scientific Reports*. 12(1): 16038. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20459-2>
- Montenegro Hernández, A., S. Castro, M., & Rodríguez Paez, J. E. (2006). Nanopartículas de SnO<sub>2</sub> Obtenidas por el Método de Precipitación Controlada. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 26(1-2): 51-60. Recuperado en 11 de octubre de 2023, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0255-69522006000100006&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522006000100006&lng=es&tlng=es)

- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 13(3): 169-189. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001>
- Ong, C. B., Ng, L. Y., & Mohammad, A. W. (2018). A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81: 536-551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>
- Osterloh, F. E. (2008). Inorganic Materials as Catalysts for Photochemical Splitting of Water. *Chemistry of Materials*. 20(1): 35-54. <https://doi.org/10.1021/cm7024203>
- Qi, K., Cheng, B., Yu, J., & Ho, W. (2017). Review on the improvement of the photocatalytic and antibacterial activities of ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*. 727: 792-820. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.142>
- Rella, R., Serra, A., Siciliano, P., Vasanelli, L., De, G., Licciulli, A., & Quirini, A. (1997). Tin oxide-based gas sensors prepared by the sol-gel process. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 44(1-3): 462-467. [https://doi.org/10.1016/S09254005\(97\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S09254005(97)00205-0)
- Sajjadnejad, M., Karkon, S., Haghshenas, S.M. (2024). Corrosion Characteristics of Zn-TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings Fabricated by Electro-Codeposition Process. *Advanced Journal of Chemistry, Section A*. 7(2): 209-226. <https://doi.org/10.48309/ajca.2024.418391.1425>
- Sharma, D. K., Shukla, S., Sharma, K. K., & Kumar, V. (2022). A review on ZnO: Fundamental properties and applications. *Materials Today: Proceedings*. 49: 3028-3035. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>
- Sonawane, R. S., Hegde, S. G., & Dongare, M. K. (2003). Preparation of titanium (IV) oxide thin film photocatalyst by sol-gel dip coating. *Materials Chemistry and Physics*. 77(3): 744-750. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00138-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00138-4)
- Souza, R. P., Freitas, T. K. F. S., Domingues, F. S., Pezoti, O., Ambrosio, E., Ferrari-Lima, A. M., & Garcia, J. C. (2016). Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 329: 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.06.013>



- Srivastava, M., Ojha, A. K., Chaubey, S., Singh, J., Sharma, P. K., & Pandey, A. C. (2010). Investigation on magnetic properties of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles synthesized under surfactant-free condition by hydrothermal process. *Journal of Alloys and Compounds*. 500(2): 206-210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.245>
- Su, K., Liu, H., Gao, Z., Fornasiero, P., & Wang, F. (2021). Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> -Based Photocatalysts. *Advanced Science*. 8(8): 2003156. <https://doi.org/10.1002/advs.202003156>
- Taques Tractz, G., Staciaki Da Luz, F., Masetto Antunes, S.R., Do Prado Banczek, E., Taras Da Cunha, M., & Pinto Rodrigues, P.R. (2021). Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> synthesis and characterization by Pechini method to the application as electron transport material in a solar device. *Solar Energy*. 216: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.029>
- Thampi, K., Varahala Reddy, T., Ramakrishnan, V., & Kuriacose, J. C. (1983). Mechanism of photoelectrocatalytic dehydrogenation of 2-propanol on a polycrystalline ZnO photoelectrode. *Electrochimica Acta*. 28(12): 1869-1874. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(83\)87028-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(83)87028-5)
- Tian, T., Zhang, J., Ge, S., Zhai, Z. (2024). Photocatalytic Degradation of Gaseous Benzene Using Cu/Fe-Doped TiO<sub>2</sub> Nanocatalysts under Visible Light. *Molecules*. 29: 144. <https://doi.org/10.3390/molecules29010144>
- Weng, B., Qi, M.-Y., Han, C., Tang, Z.-R., & Xu, Y.-J. (2019). Photocorrosion Inhibition of Semiconductor-Based Photocatalysts: Basic Principle, Current Development, and Future Perspective. *ACS Catalysis*. 9(5): 4642-4687. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b00313>
- Wojtasik, K., Zięba, M., Tyszkiewicz, C., Pakieła, W., Żak, G., Jeremiasz, O., Gondek, E., Drabczyk, K., & Karasiński, P. (2023). Zinc Oxide Films Fabricated via Sol-Gel Method and Dip-Coating Technique—Effect of Sol Aging on Optical Properties, Morphology and Photocatalytic Activity. *Materials*. 16(5): 1898. <https://doi.org/10.3390/ma16051898>
- Yilbas, B. S., Al-Sharafi, A., & Ali, H. (2019). Surfaces for Self-Cleaning. En *Self-Cleaning of Surfaces and Water Droplet Mobility* (pp. 45-98). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814776-4.00003-3>
- Yuan, X., Floresyona, D., Aubert, P.-H., Bui, T.-T., Remita, S., Ghosh, S., Brisset, F., Goubard, F., & Remita, H. (2019). Photocatalytic degradation of organic pollutant with polypyrrole nanostructures under UV and visible

light. *Applied Catalysis B: Environmental*. 242: 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.002>

Zeng, J., Li, J., Zhong, J., Yang, H., Lu, Y., & Wang, G. (2015). Improved Sun light photocatalytic activity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prepared with the assistance of CTAB. *Materials Letters*. 160: 526-528. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.08.037>

Zhang, L., Cheng, H., Zong, R., & Zhu, Y. (2009). Photocorrosion Suppression of ZnO Nanoparticles via Hybridization with Graphite-like Carbon and Enhanced Photocatalytic Activity. *Journal of Physical Chemistry C*. 113(6): 2368-2374. <https://doi.org/10.1021/jp807778r>

Zhang, Y., Wang, D., & Zhang, G. (2011). Photocatalytic degradation of organic contaminants by TiO<sub>2</sub>/sepiolite composites prepared at low temperature. *Chemical Engineering Journal*. 173(1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.028>