

Materiales de construcción fotocatalíticos para reducir la contaminación del aire

Magaly Yajaira Nava Núñez, Azael Martínez de la Cruz

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
magaly.navanu@uanl.edu.mx, azael.martinezdl@uanl.edu.mx

RESUMEN

En los últimos años, el problema de la contaminación del aire en las grandes ciudades ha llamado mucho la atención. Por ello se buscan soluciones innovadoras para contrarrestar la gran cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera a diario por la industria y los automóviles. La incorporación de fotocatalizadores en materiales de construcción ha surgido como alternativa de remediación ambiental, confiriéndole a los materiales convencionales propiedades de purificación de aire y autolimpieza. El propósito de este trabajo es presentar aspectos relevantes del desarrollo de materiales de construcción fotocatalíticos: sus principales aplicaciones, tendencias y perspectivas a mediano y largo plazo.

PALABRAS CLAVE

Fotocatálisis, construcción, semiconductores, autolimpieza, NO_x.

ABSTRACT

In recent years, the problem of air pollution in large cities has attracted a lot of attention. For this reason, innovative solutions are sought to counteract the large amount of pollutants emitted into the atmosphere on a daily basis by industry and automobiles. The incorporation of photocatalysts in construction materials has emerged as an environmental remediation alternative, giving conventional materials air purification and self-cleaning properties. This paper aims to present relevant aspects of the development of photocatalytic construction materials: their main applications, trends, and perspectives in the medium and long term.

KEYWORDS

Photocatalysis, construction, semiconductors, self-cleaning, NO_x.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire ha cobrado reconocimiento y prominencia en las agendas de cumbres mundiales de naciones sobre la protección de la salud y el medioambiente, siendo considerada una de las principales problemáticas a las que se enfrentan las ciudades más pobladas del mundo.¹ Teniendo en cuenta que alrededor del 55 % de la población mundial se concentra en las grandes urbes, un alto porcentaje de las personas respira un aire de mala calidad.² Aunque siempre ha existido la contaminación atmosférica de origen natural, fue a partir del descubrimiento del fuego cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica, la cual ha cobrado importancia sobre todo a partir de la Revolución Industrial con el uso masivo de combustibles fósiles como principal fuente de energía. La contaminación del aire tiene una serie de efectos perjudiciales para la salud humana y el medioambiente. Estudios recientes han demostrado que inhalar aire contaminado incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias como neumonía y asma, además de que aumenta el riesgo de contraer formas graves de COVID-19, cáncer y enfermedades cardíacas.³

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido seis contaminantes criterio para definir la calidad del aire exterior: ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM) y plomo (Pb).^{4,5} Entre estos

contaminantes atmosféricos, los NO_x representados por el NO_2 constituyen uno de los agentes más nocivos para los seres humanos y el medioambiente. La formación de NO_x en el aire se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas, principalmente llevados a cabo en automóviles con motores de combustión interna. Las principales fuentes de generación de NO_x provienen de las emisiones producidas por las industrias y el parque vehicular. Los NO_x pueden permanecer en la atmósfera durante varios días y en ese período reaccionar con otros compuestos, produciendo la lluvia ácida y el smog fotoquímico. Este proceso de acidificación afecta las edificaciones y monumentos históricos, limitando además el crecimiento vegetal y causando el deterioro del agua y el aire.

La gravedad de los efectos y la peligrosidad de los gases NO_x ya se han puesto de manifiesto, lo que ha resaltado la importancia de aplicar técnicas y estrategias para la reducción y eliminación de estos gases. En la actualidad, varias restricciones han sido impuestas por los protocolos de Gotemburgo y Kioto, las cuales se refieren al desarrollo de nuevas tecnologías o a la mejora de los métodos existentes.⁶ Entre las distintas tecnologías disponibles en la actualidad para el control y eliminación de NO_x se pueden mencionar los denominados métodos primarios y secundarios, los cuales se presentan en la figura 1. Los métodos primarios se basan en la prevención de la formación de NO_x mientras que los métodos secundarios se aplican una vez que los NO_x fueron generados y emitidos a la atmósfera.⁷ Entre las tecnologías secundarias más utilizadas para este propósito podemos mencionar los procesos de absorción, quelación y separación de fase. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas no son suficientes para llevar a cabo la completa conversión de los gases NO_x , además de que pueden causar contaminación secundaria. Recientemente se ha propuesto una estrategia novedosa y práctica para reducir el NO_x atmosférico y para mejorar la calidad del aire tanto en el exterior como en el interior: la fotocatalisis heterogénea.

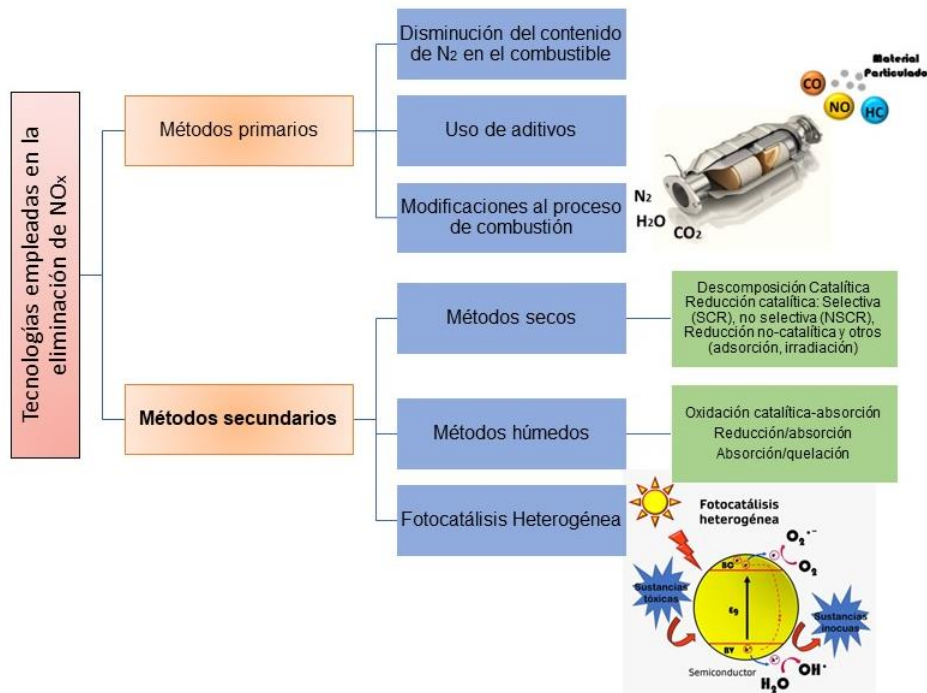


Fig. 1. Tecnologías utilizadas para reducción de contaminantes atmosféricos tipo NO_x .

FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea pertenece al grupo de las denominadas tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs), junto con otros procesos basados en la generación de radicales oxidantes. La fotocatalisis heterogénea es un proceso en el que la radiación electromagnética promueve una serie de reacciones químicas en la superficie de un material fotocatalizador. Los fotocatalizadores son

materiales semiconductores, es decir, materiales que incrementan su conductividad eléctrica cuando son iluminados con una energía específica. Los semiconductores que son estables bajo iluminación visible y ultravioleta típicamente son los óxidos metálicos. En la literatura destaca el empleo de óxidos tales como TiO_2 , ZnO , WO_3 , MoO_3 , Fe_2O_3 y SnO_2 .⁸ Este tipo de semiconductores pueden degradar una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos a sustancias menos tóxicas tanto en fase acuosa como en fase gaseosa. La estructura electrónica de los materiales semiconductores se encuentra caracterizada por una banda de menor energía conocida como banda de valencia en la cual se encuentran los electrones, una banda de mayor energía denominada banda de conducción, la cual se encuentra vacía, y en medio de éstas una región denominada banda de energía prohibida o *band gap* (E_g), en donde ningún electrón puede permanecer.

En la figura 2 se esquematiza el mecanismo de fotocatalisis heterogénea, el cual presenta ciertas similitudes con el proceso natural de fotosíntesis realizado por las plantas, en donde la clorofila tiene la capacidad de absorber la luz solar para convertir el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en oxígeno (O_2) y glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). En el caso de la fotocatalisis, el semiconductor se activa por un proceso de excitación causado por una radiación incidente de energía apropiada, lo que origina una serie de reacciones químicas que conducen a la descomposición de los contaminantes. El proceso de fotocatalisis inicia de manera inmediata una vez que el óxido semiconductor es irradiado por una fuente de iluminación, generando partículas cargadas eléctricamente como son los electrones y huecos. Un fotón incidente con energía igual o mayor al ancho de banda prohibida del material semiconductor promoverá que un electrón migre de su banda de valencia (BV) a su banda de conducción (BC), dejando un hueco o vacante en la banda de valencia. Los pares electrón-hueco fotogenerados pueden migrar de manera separada hasta la superficie del semiconductor y reaccionar con moléculas de agua y oxígeno adsorbidos para producir especies altamente oxidantes como radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) con un potencial de reducción estándar ~ 2.8 V y aniones superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$).⁹ Estos radicales son muy reactivos y son los que generan la producción de reacciones de oxidación y reducción de los contaminantes hasta degradarlos o transformarlos en sustancias inocuas.

Entre las aplicaciones de la fotocatalisis heterogénea se pueden mencionar la descontaminación del agua, el desarrollo de superficies autolimpiantes, antibactericidas, antivirales y espejos antiempañantes, la conversión de CO_2 y la purificación del aire, principalmente para la eliminación de gases tipo NO_x , SO_x y COVs.^{10,11} Con respecto a otras técnicas de reducción de NO_x , la tecnología de fotocatalisis ofrece múltiples ventajas debido a que el proceso fotocatalítico se realiza a temperatura ambiente y a presión atmosférica, no requiere reactantes químicos adicionales, la activación del material se logra por medio de energía solar o de lámparas, y el fotocatalizador no se consume durante la reacción fotocatalítica. Éstas son razones por las que hoy en día la tecnología de fotocatalisis heterogénea se está posicionando como un prometedor sistema de remediación ambiental.

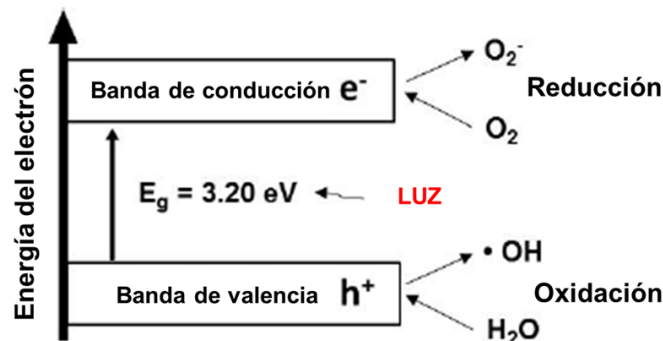


Fig. 2. Esquema representativo de las reacciones principales del proceso fotocatalítico inducidas por irradiación de un semiconductor.

APLICACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCION

El interés por el empleo de la tecnología de fotocatalisis heterogénea ha crecido considerablemente durante las últimas décadas y se ha convertido en una tecnología muy atractiva en el sector de la construcción. Las primeras investigaciones en este rubro fueron realizadas por Italcementi Group y Mitsubishi Companies. Desde entonces se han evaluado los efectos de la adición de óxidos fotocatalizadores a los materiales de construcción, principalmente en pinturas, estucos y materiales base cemento, con el propósito de conferirles propiedades avanzadas, tales como autolimpieza y purificación de aire.^{12,13} En la tabla I se aprecia una amplia gama de productos de construcción comercializados en diferentes países.

En el sector de la construcción, el cemento es el material mayormente utilizado y se encuentra presente de manera continua en casi todos los espacios de nuestra vida diaria, soportando niveles de contaminación elevados. La configuración plana de las fachadas de las edificaciones facilita la exposición del óxido fotocatalizador a la luz; además, la estructura porosa de los materiales base cemento facilita la absorción de los contaminantes. Los óxidos semiconductores pueden ser añadidos a los materiales cementantes en el proceso de mezclado o mediante la aplicación de un revestimiento superficial. El efecto sinérgico del cemento y los óxidos semiconductores, principalmente TiO₂, ha permitido el desarrollo y la comercialización de nuevos materiales fotocatalíticos capaces de acelerar las reacciones de oxidación.

Tabla I. Materiales de construcción fotocatalíticos comercializado en diferentes países.

Producto	Compañía	Características
TX Active®	Grupo Italcementi	Cemento fotocatalítico. Purificación de aire, específicamente para eliminación de NO _x .
KNOxOUT™	Boysen	Pintura fotocatalítica. Purificación de aire, específicamente para eliminación de NO _x .
AiroCide®	KES Science and Technology	Purificación de aire. Eliminación de contaminantes gaseosos y bacterias.
NOXER	Mitsubishi Materials	Adoquín fotocatalítico. Purificación de aire.
Auranox®	MonierLifetile	Tejas fotocatalíticas para la eliminación de gases NO _x .
Prosolve®	Ellegant Embellishments	Módulos (Baldosas) para la construcción de edificios como smog.
Aircoo®	SunZone	Ventilador de aire fresco que purifica el aire.
Airsopure®	Airtech International	Filtro de aire con propiedades fotocatalíticas.
Airverclean®	Nihon Fujiair	Purificación de aire.
TG Purple®	ToyadaGosei	Purificación de aire para interiores de automóviles con el uso de una lámpara LED.
PF3	ChemSpec	Impermeabilizante con propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes.
NOx-Activ®	Icopal	Láminas impermeabilizantes que purifican el aire.
Photo-Cat®	Purifics Environmental Technologies	Tratamiento de aguas residuales.
PilkingtonActiv™	Pilkington	Vidrio con propiedades autolimpiantes.
Folium	Industrias Pesadas de Kawasaki	Recubrimiento fotocatalítico con propiedades autolimpiantes.
Hydrotech®	Deutsche Steinzeug	Recubrimiento fotocatalítico con propiedades autolimpiantes y antimicrobianas.
Greentek	Thermotek	Impermeabilizante fotocatalítico para la eliminación de gases NO _x .
Oximuro	Niasa	Estuco fotocatalítico para la eliminación de gases NO _x .

Las investigaciones han demostrado que los elementos de construcción fotocatalíticos mantienen las características estéticas de las estructuras de concreto, en particular aquellas basadas en cemento blanco. Adicionalmente, favorecen las reacciones de descomposición de los contaminantes presentes en el aire, tales como NO_x, SO_x, COVs, etc., transformándolos en sustancias inocuas para las personas y el medioambiente, tal y como se puede observar en la figura 3.

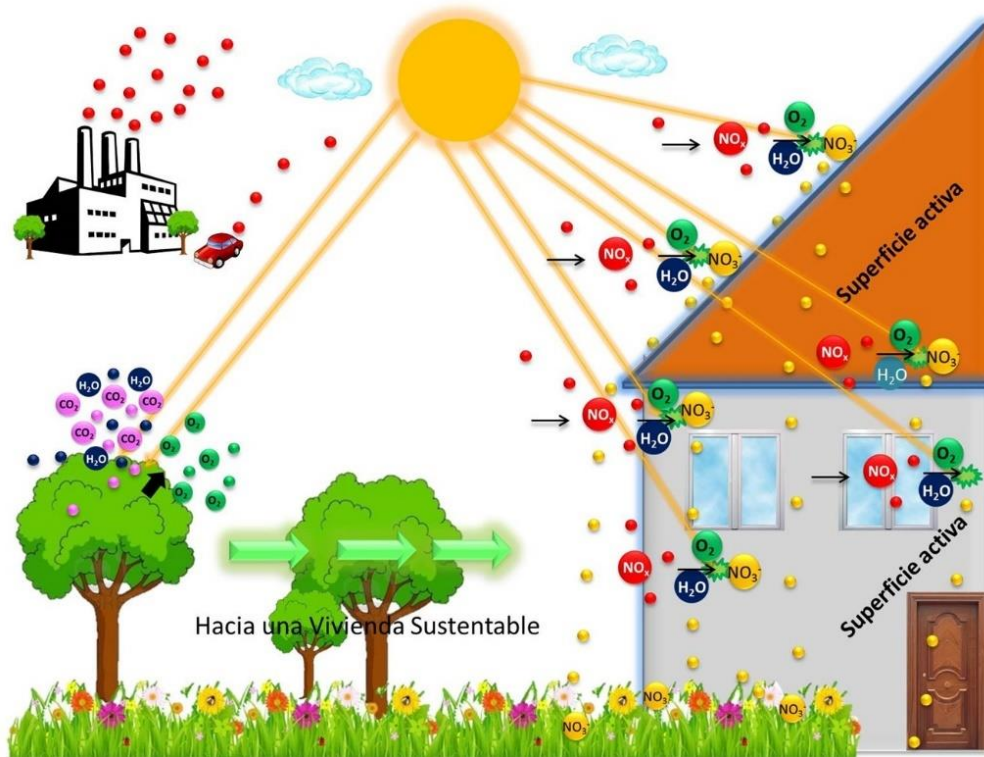
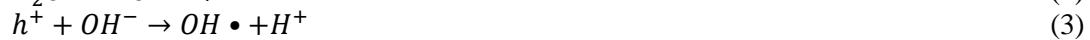


Fig. 3. Fenómeno de fotocatalisis operando en una vivienda.¹⁴

El proceso de fotooxidación de NO_x se puede describir mediante una serie de reacciones que tienen lugar durante el proceso fotocatalítico (ecuaciones 1-6), en donde los radicales hidroxilo e iones superóxido actúan como oxidantes fuertes, oxidando el óxido nítrico (NO) a dióxido de nitrógeno (NO₂) en un primer paso y posteriormente el NO₂ a iones nitrato NO₃⁻.¹⁵ Estos subproductos inocuos de reacción (iones nitrato) pueden ser eliminados de la superficie del cemento mediante el agua de lluvia o a través de procesos de lavado.



Hoy en día ya existen algunas edificaciones relevantes que han sido construidas con materiales fotocatalíticos. La iglesia Dives in Misericordia, en Roma, fue el primer edificio que utilizó paneles prefabricados de concreto fotocatalítico blanco con adición de TiO₂ (TX Millenium). Uno de los principales motivos del uso de cementos fotocatalíticos con base de TiO₂, era que el color del concreto permaneciera blanco e inalterable al paso del tiempo debido a su efecto autolimpiante. La Ciudad de

la Música y las Bellas Artes de Chambéry, Francia, es otro ejemplo de construcción con materiales fotocatalíticos. En México, una aplicación de la tecnología de fotocatalisis es la fachada de la Torre de Especialidades del Hospital General “Manuel Gea González”, ubicado en la Ciudad de México (figura 4). Esta fachada instalada en el año 2012 es el primer edificio en México y Latinoamérica que cuenta con una fachada fotocatalítica a base de un sistema de losas arquitectónicas decorativas con recubrimiento de TiO_2 nanométrico. Los módulos articulados que conforman la estructura están diseñados para facilitar la circulación del aire por la superficie, permitiendo un mayor contacto de los contaminantes atmosféricos con el fotocatalizador TiO_2 . Los proveedores informan que el edificio es capaz de eliminar la contaminación del aire generada por mil vehículos diariamente.¹⁶



Fig. 4. Primer edificio fotocatalítico en México.¹⁶

TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS

El empleo de la fotocatalisis como tecnología de vanguardia en la remediación de problemáticas como la contaminación del aire demanda óxidos semiconductores con características que los hagan más eficientes y a la vez rentables para su incorporación en matrices de materiales de construcción como el cemento. Si bien es cierto que el TiO_2 en su forma cristalina anatasa es el semiconductor utilizado en las aplicaciones de productos comerciales, la modificación de su proceso de fabricación para optimizar costos y aumentar su eficiencia fotocatalítica sigue siendo un reto para la comunidad científica enfocada en el tema. Por esta razón, el uso de semiconductores alternos al TiO_2 se vislumbra como una opción poco probable desde el punto de vista económico.

La aplicación de la fotocatalisis en materiales de construcción representa una interesante propuesta toda vez que, al estar expuestas las edificaciones a la radiación solar, éstas pueden actuar directamente en la eliminación de contaminantes atmosféricos a la par de las áreas verdes que existen en parques y plazas de las grandes ciudades.

El cemento es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción y se encuentra bien posicionado comercialmente debido a sus atributos como finura, fluidez, densidad, tiempo de fraguado, expansión y propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y flexión. Esto asegura un mercado cautivo base para el desarrollo de nuevos productos fotocatalíticos que le permitiría posicionarse rápidamente desde el punto de vista de su distribución y comercialización. Los principales productores nacionales de cemento son Cementos Mexicanos (Cemex), Holcim Apasco, Cementos y Concretos Nacionales (CYCNA), Cementos Moctezuma, entre otros, lo que crea un mercado altamente prometedor para posicionar cementos comerciales e impacta directamente en el costo final del producto.

La fabricación de los cementos y morteros fotocatalíticos no representa una modificación en la infraestructura de las industrias cementeras, toda vez que la incorporación del material activo se puede

dar en fase seca utilizando los molinos y mezcladoras ya existentes. El aspecto cultural que tenemos como sociedad es también otro punto a considerar, por lo que se requiere de una vasta estrategia comercial que invite al cliente a invertir en la compra de un producto que le brinde un entorno de aire más puro. La acción aditiva de recubrir las paredes de un complejo habitacional, edificios y fachadas, más que un esfuerzo aislado individualizado, producirá un efecto similar a la forestación realizada en parques mediante la plantación de árboles. La idea es mimetizar la cultura que tenemos desarrollada sobre la importancia de la existencia de los árboles en el ciclo del contaminante CO₂ para trasladarla a la conciencia colectiva de la sociedad para el caso de los gases NO_x.

Lo anterior debe verse acompañado de leyes gubernamentales que impulsen la reducción de contaminantes tipo NO_x de manera preventiva, pero igualmente de manera correctiva mediante la regulación de las especificaciones de los materiales de construcción de las casas habitación y edificios.

REFERENCIAS

- Balbuena J., Cruz-Yusta M., Cuevas A.L., López-Escalante M.C., Martín F., Pastor A. y Sánchez L. (2016). Enhanced activity of α -Fe₂O₃ for photocatalytic NO removal. *RSC Adv.*, 6, 92917–92922. doi:10.1039/c6ra19167c.
- Li S., Feng K. y Li M. (2017). Identifying the main contributors of air pollution in Beijing, *J. Clean. Prod.*, 163, S359–S365. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.127.
- Hüsken G., Hunger M. y Brouwers H.J.H. (2009). Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. *Build. Environ.*, 44, 2463-2474. doi:10.1016/j.buildenv.2009.04.010.
- Prinz A.L. y Richter D.J. (2019). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution: An ecological study of its effect on COVID-19 cases and fatality in Germany. *Environ. Res.*, 204, 111949. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111948>.
- Graber M., Mohr S., Baptiste L., Duloquin G. y Blanc-Labarre C. (2019). Air pollution and stroke. A new modifiable risk factor is in the air. *Environ. Neurol. Air.*, 2055, 1-6. doi:10.1016/j.neurol.2019.03.003.
- Van Vuuren D.P., Cofala J., Eerens H.E., Oostenrijk R., Heyes C., Klimont Z., Den Elzen M.G.J. y Amann M. (2006). Exploring the ancillary benefits of the Kyoto Protocol for air pollution in Europe. *Energy Policy*, 34, 444-460. doi:10.1016/j.enpol.2004.06.012.
- Ângelo J., Andrade L, Madeira L.M. y Mendes A. (2013). An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement. *J. Environ. Manage.*, 129, 522-539. doi:10.1016/j.jenvman.2013.08.006.
- Ganie A.S., Bano S., Khan N., Sultana S., Rehman Z., Rahman M.M., Sabir S., Coulon F. y Khan M.Z. (2021). Nanoremediation technologies for sustainable remediation of contaminated environments: Recent advances and challenges. *Chemosphere*, 275, 130065. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130065.
- Saravanan R., Gracia F. y Stephen A. (2017). Basic Principles, Mechanism, and Challenges of Photocatalysis. En Khan M.M., Pradhan D. y Sohn Y. (Eds), *Nanocomposites for Visible Light-induced Photocatalysis* 19-40. Springer Link. doi:10.1007/978-3-319-62446-4.
- Banerjee S., Dionysiou D.D. y Pillai S.C. (2015). Environmental Self-cleaning applications of TiO₂ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. *Applied Catal. B, Environ.*, 176–177 396-428. doi:10.1016/j.apcatb.2015.03.058.
- Fujishima A., Rao. T.N. y Tryk D.A., Titanium dioxide photocatalysis. (2000). *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1, 1-21, [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2).
- Ibrahim R.K., Hayyan M., Hayyan A. y Ibrahim S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 13754-13788. doi:10.1007/s11356-016-6457-z.

13. Ratan J.K. y Saini A. (2019). Enhancement of photocatalytic activity of self-cleaning cement. *Mater. Lett.*, 244, 178-181. doi:10.1016/j.matlet.2019.02.065.
14. Luévano-Hipólito E. y Martínez-de Cruz A. (2018). Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real weatherism. *Constr. Build. Mater.* 174, 302–309. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.095.
15. Chen J. y Poon C.S. (2009). Photocatalytic activity of titanium dioxide modified concrete materials-influence of utilizing recycled glass cullets as aggregates. *J. Environ. Manage.*, 90 3436-3442. doi:10.1016/j.jenvman.2009.05.029.
16. Salla F. (10 de marzo de 2014). *Proyectos Rhino: La fachada que se come la contaminación*. Recuperado de VisualARQ: <https://www.visualarq.com/es/proyectos-rhino-la-fachada-que-se-come-la-contaminacion/>