



Received: 07-11-2020  
Accepted: 10-11-2020

Anales de Edificación  
Vol. 6, Nº3, 75-80 (2020)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2020.4619

## Proyecto LIFE PHOTOSCALING: la sostenibilidad de la tecnología fotocatalítica en pavimentos urbanos.

## LIFE PHOTOSCALING project: the sustainability of photocatalytic technology in urban pavements for air decontamination.

Eva M<sup>a</sup> Jiménez-Relinque, Ángel Castillo Talavera, Isabel M<sup>a</sup> Martínez Sierra, Marta M<sup>a</sup> Castellote Armero

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IETcc-CSIC)  
(isabelms@ietcc.csic.es)

---

**Resumen**— El objetivo global del proyecto PHOTOSCALING del programa LIFE de la UE, es demostrar la validez, de manera sostenible, de la tecnología de fotocatalisis en núcleos urbanos. El proyecto PHOTOSCALING-LIFE pretende aportar claridad y responder a la pregunta de si la aplicación de materiales de construcción fotocatalíticos en una gran ciudad, como Madrid, es positiva y efectiva, cuantificando los beneficios y los posibles efectos secundarios perjudiciales durante toda su vida. En otras palabras, tiene la intención de demostrar la sostenibilidad del uso de este tipo de tecnología.

**Palabras Clave**— Fotocatálisis; Construcción; Calidad del Aire.

---

**Abstract**— The overall objective of the PHOTOSCALING project of the EU LIFE program is to demonstrate the validity, in a sustainable way, of photocatalysis technology in urban environments. The PHOTOSCALING-LIFE project aims to provide clarity and answer the question of whether the application of photocatalytic building materials in a large city, such as Madrid, is positive and effective, quantifying the benefits and possible harmful side effects throughout its life. In other words, it is intended to demonstrate the sustainability of the use of this type of technology.

**Index Terms**— Photocatalysis; Construction; Air quality.

## I. INTRODUCCIÓN

La fotocatalisis heterogénea es un proceso fotoquímico que forma parte de los llamados “Procesos Avanzados de Oxidación”. Esta tecnología se basa en la utilización de un material semiconductor como catalizador, el cual se activa por luz para generar reacciones redox que pueden modificar químicamente los contaminantes, convirtiéndolos en sustancias más biodegradables, o en muchos casos logrando la completa mineralización de los mismos, lo que produce su inactividad. Los beneficios de fotocatalisis son numerosos, incluyendo producción de energía limpia, protección medioambiental, mejora de la calidad del aire en ambientes exteriores e interiores y materiales con superficies autolimpiables. La investigación de fotocatalisis está documentada desde hace más de medio siglo y su interés está creciendo continuamente.

Las observaciones científicas de los efectos fotocatalíticos del dióxido de Titanio, TiO<sub>2</sub>, datan de los años 1930, donde los estudios se centraban fundamentalmente en el contexto de entender el fenómeno del “chalking” y la degradación de los colorantes en pinturas colocadas en el exterior, pero fue el artículo pionero de Fujishima y Honda, en 1972 el que impulsó el uso y la investigación de TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador (Fujishima and Honda, 1972). El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) es uno de los fotocatalizadores más utilizados. Sus principales ventajas son su elevada estabilidad química en presencia de ácidos y bases, no es tóxico, presenta un coste relativamente bajo y tiene un poder oxidante elevado, con elevada eficiencia fotónica, lo que lo hace muy competitivo para una gran cantidad de aplicaciones (Fujishima et al., 1999).

La gama de aplicaciones de la fotocatalisis que tradicionalmente ha despertado mayor interés es la degradación tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos en aguas residuales, surgiendo más recientemente la aplicación en materiales de construcción en descontaminación, purificación y desodorización de gases residuales y aire, en superficies funcionales (autolimpiantes, cristales antiniebla,...) y en aplicaciones médicas (destrucción fotocatalítica de bacterias, virus e incluso células cancerígenas) (Schaberg et al., 2005; Folli et al., 2009; Bloh et al., 2014; Jimenez and Castellote, 2014; Sapiña et al., 2017; Jimenez et al., 2015; Hu et al., 2007; Habibi et al., 2020; Bengtsson and Castellote, 2014).

Los métodos encontrados en la literatura científica para la determinación de la actividad fotocatalítica son numerosos. Adicionalmente, distintos organismos nacionales e internacionales han desarrollado normas para la determinación de la actividad que presentan diferencias entre ellos. Estas diferencias influyen en la actividad fotocatalítica que se

obtiene como resultado, con lo que determinado método de ensayo puede favorecer un material y desfavorecer a otro, así como imposibilitando en muchos casos la comparación entre procesos (Mills et al., 2012; Jimenez and Castellote, 2015; Jimenez and Castellote, 2018).

Por ello, uno de los principales problemas con que se encuentra la tecnología fotocatalítica en cuanto a su aplicación a escala real, es la dificultad para medir la eficiencia descontaminante. Es cierto que a escala de laboratorio este tema está resuelto, con ensayos normalizados ya mencionados, pero la realidad es otra; hay constantes cambios de radiación solar, de humedad relativa, de régimen de vientos, de temperaturas, de confinamiento por efecto de la arquitectura urbana, etc, en una misma localización, lo que complica su monitorización y, por tanto, la valoración de la eficiencia final. Esto, junto con la falta de protocolos de referencia para establecer criterios de aceptación y rechazo en relación con la actividad, la durabilidad o los posibles efectos secundarios tras su aplicación en pavimentos, supone una barrera que a juicio del equipo LIFE-PHOTOSCALING desalienta a las autoridades públicas y a particulares en la implementación de esta tecnología.

## II. METODOLOGÍA

Para dar respuesta a estos problemas nace el proyecto LIFE-PHOTOSCALING financiado por la UE (2014 – 2019), liderado por el Instituto Eduardo Torroja del CSIC y con la participación del Ayuntamiento de Madrid y la UPM. En este proyecto se han llevado a cabo las siguientes actividades:

1. Desarrollo de dos plataformas de demostración en las instalaciones del CSIC, una en Madrid (M-P) y otra en Arganda del Rey (AR-P) (mismos materiales, emplazamientos diferentes) a escala de planta piloto.
2. Desarrollo de prototipos para la medición in situ de la eficiencia fotocatalítica (PHOTONSITE) y de la emisión de nanopartículas por simulación de la fricción con los neumáticos (TEMIS-1000), patentadas por los autores.
3. Desarrollo de indicadores para la evaluación de la eficiencia fotocatalítica, comportamiento intrínseco del material y posibles efectos no deseados.
4. Modelado de los procesos fotocatalíticos junto con las acciones ambientales.
5. Desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, para evaluar cada solución en particular, incluida una evaluación del ciclo de vida (LCA).
6. Validación de la herramienta desarrollada en condiciones reales.

### A. Plataformas de demostración

El proyecto se inició con una invitación abierta, publicada en el Boletín oficial del Ayuntamiento de Madrid, por parte del equipo LIFE-PHOTOSCALING, a los fabricantes de productos fotocatalíticos, para aplicar sus productos en las dos plataformas demostrativas anteriormente comentadas. En la selección de los productos el criterio fundamental fue el de la representatividad de materiales (distintas familias), el mayor valor añadido por Networking con otros proyectos que se estaban desarrollando en nuestro país en los que se estaban ya estudiando algunos productos concretos, y a igualdad de condiciones anteriores, la actividad fotocatalítica mayor. Finalmente se testaron emulsiones sobre asfalto y baldosas, slurries percolados en asfalto y baldosas fotocatalíticas (prefabricados de hormigón y cerámicos con impresión 3D). En total 10 combinaciones de materiales diferentes.

Se construyeron las dos plataformas, cada una de las cuales está constituida por 3 bancos de pruebas, uno de ellos para envejecimiento natural, otro para lixiviación y el tercero para ensayos de fricción. El conjunto se completa con un banco referencia con los mismos materiales sin fotocatalizador y con una estación meteorológica. Cada banco de pruebas está constituido por losas de cada uno de los materiales de 2 m<sup>2</sup> o 4 m<sup>2</sup>. El banco de pruebas de lixiviación está preparado para recogida de los lixiviados procedentes de cada uno de los fotocatalizadores (ver figura 1).



Fig. 1. Ejemplo de banco de pruebas para lixiviación en plataforma M-P.

### B. Ensayos en las plataformas

En los materiales de estas plataformas se han llevado a cabo distintos ensayos, tanto in situ como en el laboratorio, realizándose más de 33 tipos diferentes de pruebas y más de 1600 ensayos correspondientes a los 3 bloques independientes que se llevaron a cabo en paralelo: 1) Eficiencia fotocatalítica,

2) Comportamiento intrínseco del material y 3) Posibles efectos no deseados. Como ejemplos de algunos resultados, señalar que con respecto a la disminución de la eficiencia de NO<sub>x</sub> a lo largo del tiempo, datos durante 17 meses medidos in situ con el prototipo PHOTONSITE desarrollado por los autores (Figura 2) indicaron que las emulsiones fotocatalíticas sobre el asfalto poroso experimentaron una pérdida significativa de actividad a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones climáticas (Jimenez et al., 2019; Hingorani et al., 2020).



Fig. 2. Medida in situ con el reactor PHOTONSITE.

Sin embargo, la eficiencia de los slurries y baldosas de hormigón, con el fotocatalizador aplicado en la superficie o en masa, principalmente dependía de la humedad del sustrato con una dependencia diferente para cada familia de materiales.

La actividad fotocatalítica se comprobó también mediante el uso de sondas de oxidación y reducción para determinar la producción de radicales hidroxilo y electrones libres respectivamente (Jimenez and Castellote, 2019).

Estas medidas se realizaron gracias al equipo PHOLOURING (figura 3), desarrollado por los autores, se encuentra bajo patente y ha resultado ser una herramienta fundamental para la evaluación de la actividad fotocatalítica in situ, evitando la realización de ensayos destructivos que implican extracción de testigos para su análisis en laboratorio. Además, es fundamental para la monitorización del comportamiento de material con el tiempo, evaluando cómo el paso de vehículos, el desgaste, la suciedad o la limpieza con agua a presión pueden afectar a la actividad del producto fotocatalítico.

Paralelamente, se ha llevado a cabo la medición de la concentración de NO y NO<sub>2</sub> a ras de suelo de forma simultánea sobre una losa fotocatalítica y su referencia sin

fotocatalizador mediante sensores low cost, calibrados cada 3 meses en las estaciones de calidad del aire más cercanas a cada una de las plataformas, del Ayuntamiento de Madrid y Comunidad de Madrid respectivamente. A partir de estos datos se ha llevado a cabo una modelización de la actividad con las acciones ambientales mediante el desarrollo de un modelo GAM entrenado utilizando los datos obtenidos en las plataformas, que permiten obtener una estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO<sub>2</sub>.



Fig. 3. Medida in situ con el equipo PHOLOURING.

### C. Aplicación a escala real

De entre los productos ensayados, el que obtuvo la mejor puntuación se aplicó a escala real en la calle José Antonio de Armona de Madrid (Cordero et al., 2020). Tras la aplicación a escala real, se realizaron los ensayos de control tanto in-situ como en laboratorio, a partir de testigos tomados antes y después de la aplicación. Se llevaron a cabo los ensayos correspondientes a los Indicadores, pudiéndose validar los resultados obtenidos en las plataformas. Desde diciembre de 2018 a junio de 2019, se evaluó la eficiencia descontaminante del pavimento “in situ” mediante el dispositivo PHOTONSITE y sondas colorimétricas; se evaluó la emisión de nanopartículas por fricción mediante TEMIS-1000 y se analizó la lixiviación de Ti (Jimenez et al., 2020a), así como pH, conductividad y nitratos mediante sonda multiparamétrica.

En cuanto a evaluación ambiental, se midió la concentración de nanopartículas en ambiente, no detectándose variación estadísticamente significativa en la concentración numérica o la distribución del tamaño de partículas finas suspendidas en la calle fotocatalítica en comparación con las calles vecinas.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los productos fotocatalíticos utilizados en las plataformas, se alcanzaron reducciones de NO<sub>2</sub> a nivel del suelo del 0% al 30% dependiendo de las condiciones

atmosféricas y del tipo y edad del fotocatalizador. Se observaron mayores valores de porcentajes de descontaminación que en los resultados obtenidos con los ensayos normalizados, lo que se ha atribuido a la magnitud de las concentraciones de NO y NO<sub>2</sub>, cercanas a un orden de magnitud menor en el aire ambiente, al elevado flujo de gas en los ensayos normalizados y a la influencia de la humedad relativa ambiental.

Todos estos ensayos han permitido la discriminación de los aspectos más importantes a implementar en ensayos de laboratorio específicos para evaluar los sub-indicadores (SI) dentro en cada uno de los tres grupos de indicadores previamente identificados, que han permitido establecer la conformidad de un producto (Jimenez et al., 2020b). Los productos han sido evaluados puntuando sus propiedades, siendo:

### ***I1: Indicador Eficiencia fotocatalítica (PPE)***

- SI1-1: Band-Gap y posición de las bandas (eV): Distancia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción y nivel de energía de las mismas.
- SI1-2: Eficiencia fotocatalítica del producto, según la Norma ISO 22197-1 (versión simplificada)
- SI1-3: Adherencia del producto fotocatalítico al sustrato, según la Norma *Cross-Cut Test* ISO 2409: 2013 modificada.
- SI1-4: Susceptibilidad a la carbonatación (ensayo diseñado ad hoc)

### ***I2: Comportamiento intrínseco del material (IP)***

- I2-1: Coeficiente de resistencia al deslizamiento, con el péndulo TRRL, según Norma EN14231.

### ***I3: Posibles efectos no deseados (USE).***

- SI3-1: Lixiviación de partículas de titanio (mgr Ti/cm<sup>2</sup>) mediante 2 ensayos diferentes simulando agua de lluvia (ensayo según la Norma CEN/TS 16637-2 modificada) y agua tras la limpieza de calles con agua a presión. Este ensayo no tiene normativa asociada y se ha diseñado un ensayo ad hoc mediante irrigación.
- SI3-2: Nivel de emisión de nanopartículas a la atmósfera mediante ensayo con TEMIS-1000, medido en Ud x 1000/cm<sup>3</sup>
- SI3-3: Selectividad en la conversión fotocatalítica a nitratos, determinada a partir del mismo ensayo que para el I1-2.

Como se ha mencionado, de entre los productos ensayados, el que obtuvo la mejor puntuación se aplicó a escala real en la calle José Antonio de Armona de Madrid. La calle Bernardino Obregón (sin tratamiento fotocatalítico) sirvió de “blanco” a efectos de comparación de resultados. Se tomaron muestras de aire para análisis de partículas y sólo ocasionalmente, las

partículas capturadas contenían Ti, pero siempre estaban en el rango de tamaño de micrómetros (Nevshupa et al., 2020). Esto lleva a la conclusión de que para el producto aplicado, las nanopartículas no se liberaron en una cantidad significativa del recubrimiento fotocatalítico al aire de acuerdo con los resultados obtenidos para ese producto utilizando la herramienta “*PhotoScaling Decision Maker*”.

Respecto a la monitorización de la eficiencia fotocatalítica en ambiente, se realizó mediante los sensores de bajo coste utilizados en las plataformas, mediante tubos pasivos y mediante la aplicación del modelo GAM desarrollado. Se utilizaron dos métodos distintos de cuantificación con los que se obtuvieron eficiencias de eliminación de NO<sub>2</sub> ambiental entre el 1% y el 4% a unos tres metros de altura. Cabe señalar que ninguno de ellos métodos se puede considerar estadísticamente significativo por la elevada incertidumbre en las medidas. La aplicación del modelo GAM dio como resultado un 28.6% de reducción media de NO<sub>2</sub> a nivel de suelo durante los tres primeros meses de aplicación (Cordero et al., 2020; Cordero et al., 2021).

#### IV. CONCLUSIONES

Los productos fotocatalíticos pueden ser a futuro una solución para contribuir a la descontaminación del aire. El principal problema actual es la falta de criterios para la evaluación de su eficiencia in situ.

Este proyecto, supone un hito en la evaluación de materiales de construcción fotocatalíticos, ya que por primera vez se dispone de criterios de conformidad cuantificados que permiten la aceptación o rechazo de un producto. La herramienta que permite esta evaluación a partir de los SI mencionados está alojada en la página web del proyecto, <https://www.life-photoscaling.eu>, y es de libre uso. Es una herramienta viva que se irá actualizando en base al nuevo conocimiento del que se vaya disponiendo. Los rangos de parametrización de cada sub-indicador así como los umbrales de aceptación se presentan en la web, en la que se ha implementado una ventana para hacer llegar comentarios al equipo Life-Photoscaling al respecto.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la co-financiación del programa LIFE a través del proyecto LIFE13ENV/ES/001221 a los fabricantes de los productos fotocatalíticos por su suministro para el proyecto y a todos los que de una forma u otra han participado en el proyecto.

#### REFERENCIAS

Bengtsson, N.; Castellote, M. (2014). Heterogeneous photocatalysis on construction materials: effect of catalyst properties on the efficiency for degrading NO<sub>x</sub> and self

- cleaning, *Materiales de Construcción*, 64, 013.
- Bloh, J.Z.; Folli, A.; Macphee, D. (2014) Photocatalytic NO<sub>x</sub> abatement: Why the selectivity matters, 4, 45726-45734.
- Cordero, J.; Hingorani, R.; Jimenez, E.; Grande, M.; Borge, R.; Narros, A.; Castellote, M. (2020). NO<sub>x</sub> removal efficiency of urban photocatalytic pavements at pilot scale, *Science of The Total Environment*, (2020) 137459.
- Cordero, J.; Hingorani, R.; Jimenez, E.; Grande, M.; Cutillas, F.; Martinez, E.; Borge, R.; Narros, A.; Castellote, M. (2021). Challenges in quantification of photocatalytic NO<sub>2</sub> abatement effectiveness under real world exposure conditions illustrated by a case study, *Science of The Total Environment*, 766, 144393.
- Folli, A.; Jakobsen, U.; Guerrini, Macphee, D. (2009). Rhodamine B discolouration on TiO<sub>2</sub> in the cement environment: a look at fundamental aspects of the self-cleaning effect in concretes, 12, 126-133.
- Fujishima, A.; Honda, K.J.n. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, 238 (1972) 37.
- Fujishima, A.; Hashimoto, K.; Watanabe, T. (1999) TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: Fundamentals and Application, 1ed ed., Tokyo, 1999.
- Jimenez, E.; Castellote, M. (2014). Influence of the inlet air in efficiency of photocatalytic devices for mineralization of VOCs in air-conditioning installations, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21, 11198-11207.
- Jimenez, E.; Rodriguez, J.; Castillo, A.; Castellote, M. (2015). Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious materials: Type of binder, roughness and microstructure, *Cem Concr Res*, 71, 124-131.
- Hu, C.; Guo, J.; Qu, J.; Hu, X. (2007). Photocatalytic degradation of pathogenic bacteria with AgI/TiO<sub>2</sub> under visible light irradiation, *Langmuir*, 23, 4982-4987.
- Habibi, A.; Asadzadeh, S.; Feizpoor, S.; Rouhi, A. (2020). Review on heterogeneous photocatalytic disinfection of waterborne, airborne, and foodborne viruses: Can we win against pathogenic viruses?, *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Hingorani, R.; Jimenez, E.; Grande, M.; Castillo, A.; R. Nevshupa, Castellote, M. (2020). From analysis to decision: revision of a multifactorial model for the in-situ assessment of NO<sub>x</sub> abatement effectiveness of photocatalytic pavements, *Chemical Engineering Journal*, 126250.
- Jimenez, E.; Castellote, M. (2015). Quantification of hydroxyl radicals on cementitious materials by fluorescence spectrophotometry as a method to assess the photocatalytic activity, *Cem Concr Res*, 74, 108-115.
- Jimenez, E.; Castellote, M. (2018). Hydroxyl radical and free and shallowly trapped electron generation and electron/hole recombination rates in TiO<sub>2</sub> photocatalysis

- using different combinations of anatase and rutile, *Applied Catalysis A: General*.
- Jimenez, E.; Hingorani, R.; Rubiano, F.; Grande, M.; Castillo, A.; Castellote, M. (2019). In situ evaluation of the NO<sub>x</sub> removal efficiency of photocatalytic pavements: statistical analysis of the relevance of exposure time and environmental variables, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 36088-36095.
- Jimenez, E.; Castellote, M. (2019). Quick assessment of the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> construction materials by nitroblue tetrazolium (NBT) ink, *Construction and Building Materials*, 214, 1-8.
- Jimenez, E.; Grande, M.; Duran, T.; Castillo, A.; Castellote, M. (2020a). Environmental impact of nano-functionalized construction materials: leaching of titanium and nitrates from photocatalytic pavements under outdoor conditions, *Science of The Total Environment*, 140817.
- Jimenez, E.; Rubiano, F.; Hingorani, R.; Grande, M.; Castillo, A.; Nevshupa, R.; Castellote, M. (2020b). A New Holistic Conceptual Framework for Assessment of Photocatalytic Pavements Performance, *Frontiers in Chemistry*, 8, 743.
- Mills, A.; Hill, C.; Robertson, P.K. (2012). Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 237, 7-23.
- Nevshupa R.; Grande M.; Martínez E.; Castellote M. (2020). Assessment of urban air pollution related to potential nanoparticle emission from photocatalytic pavements, *J. Environ. Manage.*, (2020).
- Sapiña, M.; Jimenez, E.; Nevshupa, R.; Roman, E.; Castellote, M. (2017). Degradation of pollen on nanofunctionalized photocatalytic materials, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92, 210-216.
- Schaberg, P.; Botha, J.; Schnell, M.; Hermann, H. O.; Pelz, N.; Maly, R. (2005). Emissions performance of GTL diesel fuel and blends with optimized engine calibrations, *SAE transactions*, 1074-1087.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.