

**CONAMA 2024**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Sistemas pasivos de tratamiento del aire interior

Propiedades descontaminantes y  
autolimpiantes



# CONAMA 2024

SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

**Autor Principal:** María José Mateos Muñoz (CIEMAT)

**Otros autores:** Ángela Lao Zea (CIEMAT); María Paz Alcacera Gil (CIEMAT); Alberto Rodríguez López (CIEMAT); Raúl Matesanz Sanz (CIEMAT); Gloria Simón Naranjo (CIEMAT); Silvia Suárez Gil (CIEMAT); Benigno Sánchez Cabrero (CIEMAT)

# **CONAMA 2024**

SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

## **ÍNDICE**

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Estrategias de mejora de la calidad del aire
5. Conclusiones
6. Agradecimientos
7. Bibliografía

# CONAMA 2024

SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

## RESUMEN

Este documento aborda el desarrollo y aplicación de fotocatalizadores avanzados para la eliminación de contaminantes atmosféricos, especialmente compuestos orgánicos volátiles (COV), en ambientes interiores y exteriores. Desde el contexto de la creciente necesidad de mejorar la calidad del aire, se exploran tecnologías basadas en fotocatálisis heterogénea, utilizando recubrimientos de dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) con actividad en el rango de luz visible. Estos materiales han demostrado una alta eficiencia en la degradación de COV y contaminantes biológicos bajo irradiación UV-A y luz visible, además de ofrecer propiedades autolimpiantes, lo cual facilita su aplicación en superficies de bajo mantenimiento.

A través del proyecto K-HEALTHinAIR, que incluye la colaboración del grupo FOTOAIR del CIEMAT, se implementaron estudios en entornos urbanos y hospitalarios para evaluar la contaminación de estos espacios, con el objetivo de desarrollar soluciones sostenibles que promuevan un aire interior más seguro y saludable. Los resultados destacan el potencial de estos materiales para mejorar la calidad del aire y contribuyen a la transición hacia prácticas ambientales sostenibles en el ámbito de la descontaminación atmosférica.

## INTRODUCCIÓN

La acumulación de contaminantes atmosféricos, especialmente los compuestos orgánicos volátiles (COV), ha sido un desafío creciente desde la Revolución Industrial, intensificándose con el uso de solventes y materiales industriales modernos. Estos contaminantes, típicamente derivados de procesos industriales como la producción de pinturas, adhesivos y productos de limpieza, presentan una alta presión de vapor, lo que facilita su dispersión en el aire y en aguas subterráneas. Estos compuestos son bien conocidos por sus efectos nocivos sobre la salud humana, provocando problemas respiratorios, neuronales y cardiovasculares. Además, los COV contribuyen a fenómenos atmosféricos dañinos como el smog fotoquímico, afectando tanto el medio ambiente como la salud pública. Ante estos riesgos, la reducción y control de la emisión de contaminantes se ha vuelto una prioridad.

Los materiales poliméricos son ampliamente empleados en la construcción de espacios interiores, como paneles y bloques en multitud de ambientes: hospitales, residencias, escuelas, farmacias, supermercados, oficinas, etc. El desarrollo de superficies descontaminantes y autolimpiantes podría ayudar a mejorar la calidad del aire. En este contexto, la fotocatálisis heterogénea, una tecnología perteneciente a los procesos avanzados de oxidación, ha demostrado ser una herramienta eficaz para tratamientos de desinfección, descontaminación del aire y generación de superficies autolimpiantes, tanto en espacios interiores como en exteriores. Este proceso suele utilizar materiales basados en  $TiO_2$  activados por luz UV-A o visible de baja potencia, generando especies oxidantes que pueden degradar diversos compuestos.

Uno de los desafíos actuales en esta tecnología es desarrollar sistemas inmovilizados que optimicen el aprovechamiento de la radiación solar. Los recubrimientos fotocatalíticos de dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) dopados con metales son una alternativa prometedora. Estos materiales, aplicados sobre superficies poliméricas de construcción en interiores, pueden activarse con luz UV-A y Visible para proporcionar propiedades descontaminantes y

# CONAMA 2024

## SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

autolimpiantes, haciendo posible una mayor durabilidad y contribución a la economía circular en el ámbito de la purificación de aire y superficies.

Actualmente, el grupo FOTOAIR, perteneciente al Departamento de Energía del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), participa activamente en el proyecto K-HEALTHinAIR. Ésta es una iniciativa de investigación interdisciplinaria cuyo objetivo es profundizar en el conocimiento de los contaminantes químicos y biológicos presentes en los ambientes interiores que afectan la salud humana. De esta manera, posibilita el desarrollo de soluciones que mejoren la precisión en el monitoreo y la calidad del aire en estos entornos.

A través de innovadores algoritmos de inteligencia artificial y análisis avanzados, el proyecto busca identificar los factores clave que afectan la calidad del aire en interiores y su relación con riesgos para la salud. Mediante una rigurosa investigación basada en datos de escenarios reales, la vigilancia de la salud pública y el análisis de grupos particularmente vulnerables -como pacientes de alto riesgo, K-HEALTHinAIR explora de manera integral la relación entre la calidad del aire en interiores y sus efectos perjudiciales sobre la salud.

En el marco de este proyecto, el grupo FOTOAIR ha llevado a cabo un estudio mensual de caracterización de bioaerosoles, compuestos orgánicos volátiles y partículas en diferentes áreas del Hospital Clínic de Barcelona (objeto de una segunda presentación del grupo FOTOAIR del CIEMAT). Este estudio, que se extiende desde junio de 2023 hasta mayo de 2024, incluye la recolección de muestras con periodicidad mensual, coincidiendo con la semana central de cada mes. En base a los datos obtenidos, se proponen diferentes estrategias para la mejora de la Calidad del Aire. Dentro de estas propuestas, se encuentra el desarrollo de recubrimientos fotocatalíticos sobre materiales presentes en interiores, que tengan propiedades descontaminantes y autolimpiantes. Entre ellos, se ha desarrollado recubrimientos fotoactivos basados en TiO<sub>2</sub> con nanopartículas de plata, y nitruro de carbono.

## ESTRATEGIAS DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE

Como se ha mencionado anteriormente, la fotocatálisis es una tecnología muy utilizada y versátil en términos de mejorar la calidad del aire. El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y el nitruro de carbono grafitico (g-CN) son materiales de referencia en la degradación de contaminantes. Si bien el TiO<sub>2</sub> es el fotocatalizador estándar, su principal limitación radica en su banda de absorción, que se restringe al rango UV-A (365 nm), dificultando su eficiencia bajo luz visible. Para optimizar su actividad, TiO<sub>2</sub> ha sido dopado con diversos elementos, tanto no metálicos (N, F, S, C) como metálicos (Ag, Au, Pd, Fe). Esto, junto con métodos de síntesis avanzados como sol-gel y fotodeposición, permite extender su eficiencia al rango visible, mejorando su rendimiento en aplicaciones de descontaminación en fase gaseosa.

En particular, los recubrimientos de TiO<sub>2</sub> dopados con nanopartículas de plata (TiO<sub>2</sub>/Ag) ofrecen propiedades adicionales, como autolimpieza y actividad antimicrobiana, que pueden ser de gran valor en la economía circular al reducir la necesidad de mantenimiento y productos químicos adicionales (Pelaez et al., 2012). Por su parte, el g-CN se distingue como un material fotocatalítico prometedor, con capacidad de absorción en el rango visible hasta los 450 nm. Su estructura flexible le otorgan una gran adaptabilidad en aplicaciones de descontaminación.

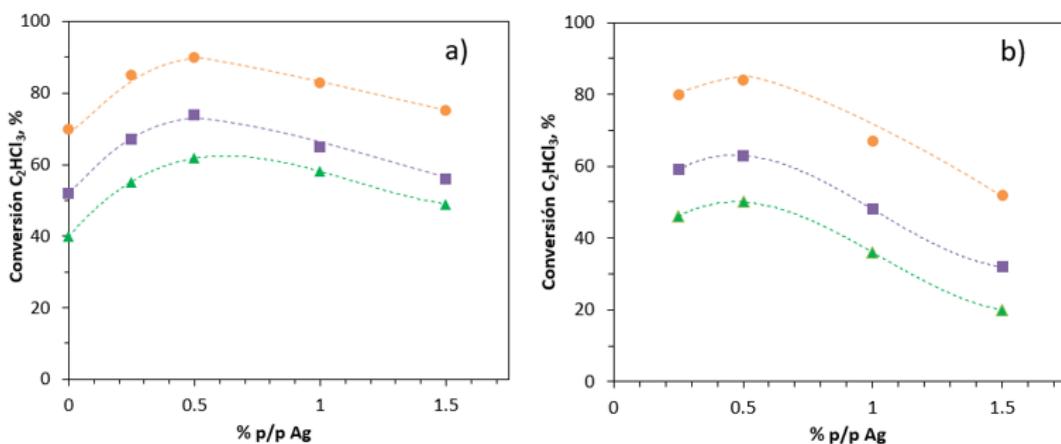
# CONAMA 2024

## SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

ambiental (Hernández-Alonso, Fresno, Suárez, & Coronado, 2009). El desarrollo de superficies que sean descontaminantes y autolimpiantes, es un punto clave para mejorar la calidad del aire.

Los materiales basados en polímeros orgánicos presentan ventajas como su ligereza, bajo costo y facilidad de manejo. Además, los materiales poliméricos son muy versátiles, pudiendo adoptar diferentes geometrías de forma sencilla. Por ello, se seleccionaron los materiales poliméricos para ser empleados como soporte de los recubrimientos desarrollados. Es importante asegurar que la película depositada sea estable a lo largo del tiempo y se mantenga intacto el aspecto visual del sustrato. Una forma de lograr esto es a través de la síntesis de soles que contienen nanopartículas de photocatalizador, que actúan como agente aglutinante (Bischoff & Anderson, 1995).

Atendiendo a los resultados obtenidos hasta el momento, se ha demostrado que la síntesis de photocatalizadores de  $\text{TiO}_2/\text{Ag}$  mediante fotodeposición mejora la capacidad de degradación de COV en fase gaseosa bajo irradiación Visible de baja potencia. En pruebas de degradación de COV (tricloroetileno, utilizado como compuesto modelo) bajo diversas condiciones de flujo y radiación, los catalizadores más efectivos alcanzaron conversiones del 90% bajo luz UV-A y del 85% con luz visible, reflejando una actividad photocatalítica significativa (Figura 1).



**Figura 1.** Resultados de la actividad photocatalítica para la fotooxidación de  $\text{C}_2\text{HCl}_3$  para las muestras de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{TiO}_2/\text{Ag}_x$  a diferentes caudales totales (●) 300 mL/min, (■) 500 mL/min, (▲) 700 mL/min, bajo radiación a) UV-A y b) Visible.

Además de su capacidad para degradar COV, los recubrimientos desarrollados mostraron excelentes propiedades autolimpiantes en el rango de luz UV y Vis. Esta propiedad fue evaluada según la norma ISO 27488:2009 “Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for self-cleaning performance of semiconducting photocatalytic materials - Measurement of water contact angle” (ISO, 2009).

Por tanto, los recubrimientos basados en  $\text{TiO}_2/\text{Ag}$  no sólo promueven la descontaminación del aire en ambientes interiores y exteriores, sino que también aportan a la sostenibilidad al ofrecer soluciones duraderas y eficientes, aprovechando la energía solar para mantener sus propiedades autolimpiantes sin la necesidad de fuentes adicionales. De esta manera, se convierten en una posible solución para mejorar la calidad del aire de los espacios interiores y exteriores.

# CONAMA 2024

## SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

Por otra parte, otro material que se está estudiando para mejorar la calidad del aire en interiores es el nitruro de carbono grafítico (g-CN), un semiconductor versátil de fácil modificación, cuya banda de absorción de 2,7 eV le permite captar luz visible hasta 450 nm, lo que resulta óptimo para aplicaciones fotoquímicas. Su estructura bidimensional, elevada estabilidad y adaptabilidad a través de dopajes y modificaciones sintéticas lo posicionan como un candidato ideal para la remediación ambiental, ya que ha demostrado ser efectivo en la degradación de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes en fase acuosa y gaseosa (Kumar, Kashyap, Sharma, & Krishnan, 2022). Por ejemplo, el g-CN dopado con metales ha mostrado alta eficiencia en la eliminación de compuestos aromáticos como el tolueno y el nitrobenceno bajo luz solar, además de probar su capacidad para degradar gases tóxicos como los óxidos de nitrógeno en forma de nanocompuestos dopados con metal (Pham, Jung, & Kim, 2021).

## CONCLUSIONES

La fotocatálisis heterogénea, particularmente con materiales con actividad en el rango de luz UV y Visible, demuestra ser una herramienta eficaz en la degradación de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes del aire. Estos desarrollos no sólo impulsan la purificación de ambientes interiores y exteriores, sino que también representan una solución sostenible y de bajo consumo energético al aprovechar la radiación solar.

Los recubrimientos de TiO<sub>2</sub> dopados con plata muestran una alta eficiencia en la degradación de COV, superando el 90% de conversión bajo luz visible. Además, estos materiales presentan propiedades autolimpiantes, lo que permite su aplicación en superficies que requieren bajo mantenimiento, alineándose con los principios de la economía circular.

El g-CN, debido a su capacidad de absorción en el rango visible, emerge como un fotocatalizador versátil y de fácil modificación. Su eficacia en la eliminación COV confirma su potencial para mejorar la calidad del aire interior, especialmente al emplearse en nanocompuestos dopados con metales.

Los materiales fotocatalíticos sintetizados, tanto de TiO<sub>2</sub>/Ag han demostrado una estabilidad operativa prolongada y una eficiencia notable bajo irradiación de luz visible y UV-A. Esto indica su viabilidad para aplicaciones a largo plazo en la descontaminación de aire en ambientes interiores, donde ofrecen un mantenimiento mínimo y una efectividad constante en la reducción de contaminantes.

Este trabajo plantea la base para estudios futuros que exploren en profundidad los mecanismos de reacción, la influencia de los dopajes metálicos en el rendimiento fotocatalítico y su aplicación en condiciones reales, siguiendo estándares como las normas ISO para asegurar resultados de calidad y replicables en el tratamiento del aire en interiores.

## AGRADECIMIENTOS

This study has been carried out in the framework of the K-HEALTHinAIR project. The K-HEALTHinAIR project, funded by the EU's Horizon Europe Programme, is making significant strides in understanding and improving indoor air quality (IAQ) and its health impacts. This innovative initiative is conducting extensive research through diverse pilot projects across

# CONAMA 2024

## SISTEMAS PASIVOS DE TRATAMIENTO DEL AIRE INTERIOR

Europe, integrating advanced IAQ monitoring techniques with public health research to tackle the effects of indoor air pollution on high-risk groups and the general population.

## BIBLIOGRAFIA

- Bischoff, B. L., & Anderson, M. A. (1995). Peptization process in the sol-gel preparation of porous anatase (TiO<sub>2</sub>). *Chemistry of materials*, 7(10), 1772-1778.
- Hernández-Alonso, M. D., Fresno, F., Suárez, S., & Coronado, J. M. (2009). Development of alternative photocatalysts to TiO<sub>2</sub>: challenges and opportunities. *Energy & Environmental Science*, 2(12), 1231-1257.
- ISO. (2009). 27448:2009; Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics)- Test Method for Self-Cleaning Performance of Semiconducting Photocatalytic Materials-Measurement of Water Contact Angle. Geneva, Switzerland.
- Kumar, A., Kashyap, S., Sharma, M., & Krishnan, V. (2022). Tuning the surface and optical properties of graphitic carbon nitride by incorporation of alkali metals (Na, K, Cs and Rb): Effect on photocatalytic removal of organic pollutants. *Chemosphere*, 287, 131988.
- Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G., . . . O'shea, K. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 125, 331-349.
- Pham, T.-H., Jung, S. H., & Kim, T. (2021). Enhanced photodegradation of toxic volatile organic pollutants using Ni-doped graphitic carbon nitride under natural solar light. *Solar energy*, 224, 18-26.