

## FOTOFILTRO DE CARBÓN ACTIVADO (C@TiO<sub>2</sub>): UN ENFOQUE PRELIMINAR PARA EL DESNITRIFICADO DE AGUAS

**Autor:** William Eduardo Albornoz<sup>1</sup> – weduardoa@udistrital.edu.co

**Docente asesor:** Jeymy Tatiana Sarmiento Monsalve<sup>2</sup> – jtsarmientom@udistrital.edu.co

**Semillero de investigación:** Física del Medio Ambiente y Energía Solar (FMAES);  
PHYSIKALISCH; CARBONES

### RESUMEN

Este estudio investiga y compara los procesos de fotocatalisis heterogénea y homogénea en la reducción de nitratos, centrándose en la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea con carbón activado mineral (C@TiO<sub>2</sub>). El carbón empleado para el fotofiltro (C@TiO<sub>2</sub>), es un carbón mineral sub-bituminoso, activado física y químicamente, el cual es caracterizado mediante SEM e IR. Además, se realizaron análisis espectrofotométricos UV y UV-Vis para evaluar la reducción de nitratos y la formación de nitritos, según los parámetros establecidos en la literatura. Estos resultados ofrecen información valiosa para futuras implementaciones industriales del Fotofiltro.

### PALABRAS CLAVES

Fotocatalisis, fotofiltro, reducción, nitratos, contaminantes, carbón activado.

### ABSTRACT

This study investigates and compares the processes of heterogeneous and homogeneous photocatalysis in nitrate reduction, focusing on the efficiency of heterogeneous photocatalysis with mineral activated carbon (C@TiO<sub>2</sub>). The carbon used for the Photofilter (C@TiO<sub>2</sub>) is a sub-bituminous mineral carbon, physically and chemically activated, which is characterized by SEM and IR. In addition, UV and UV-Vis spectrophotometric analyses were performed to evaluate nitrate reduction and nitrite formation, according to the parameters established in the literature.

<sup>1</sup> Licenciatura en Química, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

<sup>2</sup> PhD. Facultad de Ciencias y Educación – Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Docente

These results provide valuable information for future industrial implementations of the Photofilter.

## KEYWORDS

Photocatalysis, photofilter, reduction, nitrates, pollutants, activated carbon.

## INTRODUCCIÓN

La escasez global de agua potable se ha convertido en una crisis ambiental prioritaria, impactando principalmente a países en vías de desarrollo y dejando graves repercusiones sociales. Organismos como la ONU y la OMS han situado esta problemática hídrica como prioridad en la agenda de desarrollo sostenible, específicamente en el Objetivo 6 ONU-Agua, enfatizando la necesidad de implementar tecnologías para tratar y reutilizar aguas contaminadas.

Estadísticas alarmantes indican que solo el 8% de las aguas residuales reciben tratamiento en países en desarrollo, frente al 70% en naciones desarrolladas (Hallberg et al. 2015; IDEAM, 2007).

Una problemática particular es la presencia de nitratos en fuentes hídricas, los cuales son contaminantes inorgánicos perjudiciales. En respuesta, distintos grupos de investigación desarrollan tecnologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales con nitratos. En este contexto, el presente artículo describe el diseño y evaluación de un novedoso fotofiltro que implementa carbón mineral activado como soporte del dióxido de titanio como fotocatalizador para la reducción eficiente de nitratos, representando un aporte concreto frente al desafío de la crisis hídrica, cabe destacar que investigaciones previas como la de Jaramillo en 2006 y la de Kong et al. en 2020, han demostrado la eficacia del dióxido de titanio como fotocatalizador para esta transformación.

Los contaminantes en aguas, definidos por la OCDE como productos de actividades humanas, incluyen pesticidas, disolventes, detergentes y subproductos industriales, muchos de los cuales son resistentes a la degradación (Organización para la

Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2022). Las aguas residuales, domésticas, industriales y urbanas (Consejo de las Comunidades Europeas, 1991), contienen una variedad de contaminantes, como materia orgánica e inorgánica, nutrientes, patógenos y xenobióticos, que necesitan tratamiento.

En la búsqueda por soluciones efectivas, los procesos de filtración y fotocátalisis han cobrado relevancia. La filtración separa partículas en suspensión mediante medios porosos, purificando así los fluidos (López, 2019), mientras que la fotocátalisis emplea radiación UV-Visible para activar semiconductores y generar radicales hidroxilos degradantes de contaminantes. El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) destaca como semiconductor muy estudiado por su alta actividad y estabilidad (Herrmann, 1999; Jaramillo, 2006). Los sistemas de fotofiltración combinan ambos procesos, removiendo eficientemente contaminantes orgánicos e inorgánicos disueltos en agua con bajo impacto ambiental (Kong, 2020). El carbón activado sobresale como material de filtro o soporte por su

versatilidad, amplia superficie interna y capacidad de adsorción (Wu, 2018). Además, la dispersión de metales en su estructura mejora exponencialmente el rendimiento catalítico, resaltando la importancia de explorar estas sinergias para soluciones más eficientes en el tratamiento y recuperación de fuentes hídricas con presencia de nitratos.

## MÉTODOS

### 1. ÁREA DE ESTUDIO

Carboquímica, Catálisis, Mecanismo de reacción, Calidad y Tratamiento de aguas.

### 2. PREPARACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón mineral de tipo sub-bituminoso fue caracterizado previamente a través del análisis próximo y último y fue activado por métodos químicos y físicos. El material obtenido presenta una densidad de 1,23 g/ml, 32% de cenizas, 4% de humedad, 4% de material volátil, 35-45 % de carbono y 47% de carbono fijo.

### 3. FIJACIÓN CATALÍTICA

Se preparó una solución de 20 ppm de TiO<sub>2</sub> en agua destilada para 0,5 g de carbón activado. La fijación del catalizador se realizó por inmersión, mezclando la solución catalítica y el carbón tratado en agitación por ultrasonido durante 30 minutos. Luego, se filtró al vacío y el residuo sólido se calcinó a 500°C por 1 hora y 30 minutos, obteniendo el catalizador C@TiO<sub>2</sub>.

### 4. CARACTERIZACIÓN DEL FOTOFILTRO

Se caracterizó el fotofiltro mediante espectrofotometría Infrarroja (IR) para observar la interacción de moléculas de carbono y metal, y la presencia de grupos o estructuras químicas, comparando carbón activado comercial (Blanco), C@E.

Posteriormente, se analizó su morfología (tamaño de poro y fijación) por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM). Además, se analizó el C@TiO<sub>2</sub> después de utilizarlo tres veces consecutivas.

### 5. DESNITRIFICACIÓN

Se partió de una solución de aproximadamente 1100 ppm NaNO<sub>3</sub> para 0,5 g de C@TiO<sub>2</sub>, y tras 1 hora de exposición a radiación UVA artificial, se analizó la muestra, este catalizador fue puesto a reaccionar para nuevas desnitrificaciones por tres ciclos. Se analizó el proceso de desnitrificación por dos técnicas espectrofotométricas: UV a 220 nm para revisar la concentración real de Nitratos presentes siguiendo indicaciones del IDEAM, y UV-Visible a 543 nm por medio de la reacción colorimétrica de Griess para determinar Nitritos solubles formados después de la desnitrificación siguiendo indicaciones del Standard Methods (IDEAM, 2007; Eaton, 2012).

Además, se revisó la presencia de nitratos y nitritos en el leaching del primer ciclo para observar la presencia de TiO<sub>2</sub> disuelto y su capacidad de desnitrificación. Todo esto con el fin de determinar la efectividad en la desnitrificación fotocatalítica después de cada utilización del fotofiltro.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

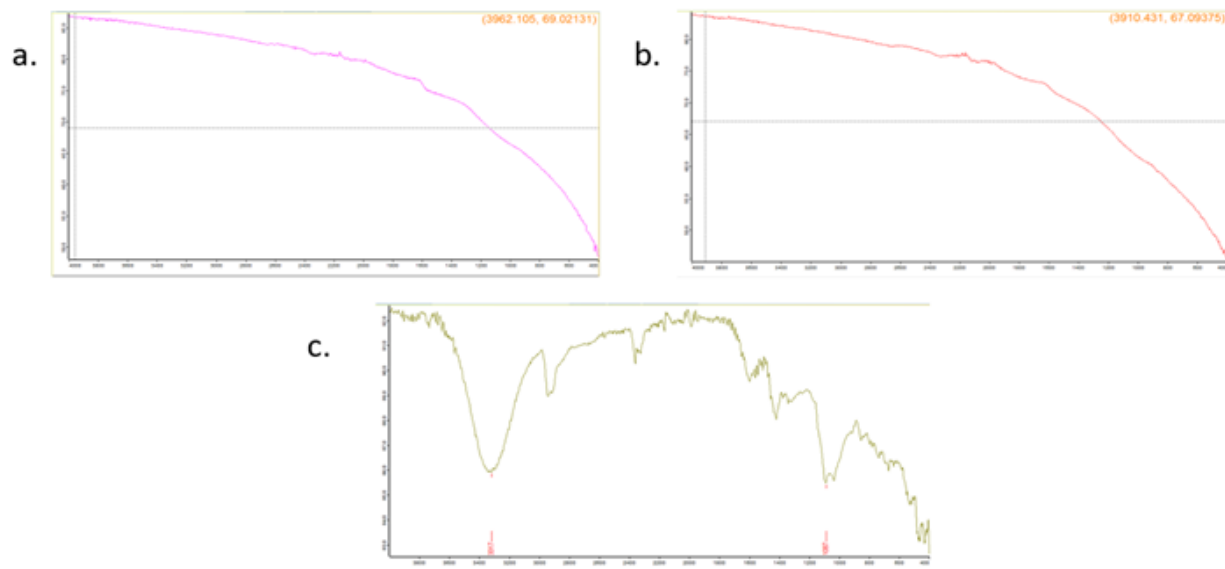
### 1. ANÁLISIS INFRARROJO COMPARATIVO

Los espectros de infrarrojo (IR) de las muestras de carbón activado permitieron analizar los cambios en las estructuras del material en los procesos de activación y en la impregnación de fotocatalizador. Como se observa en las Figuras 1.a., 1.b. y 1.c., los espectros del carbón activado experimentalmente (1.b.) presentan similitudes con el espectro del carbón activado comercial (1.a.), evidenciando la efectividad de los métodos de activación.

En cambio, el C@TiO<sub>2</sub>, (1.c) presenta varias bandas características:

- I. Bandas a 3440 y 1626 cm<sup>-1</sup> que se atribuyen a los modos vibracionales de enlaces carbono-metal, interacción entre el carbón y el catalizador de titanio, según lo reportado por Lee et al. (2012).
- II. La lectura presenta diversas bandas entre 2900, 2300, 2000, 1400, 1087, 1020 cm<sup>-1</sup> y la región entre 800-600 cm<sup>-1</sup> asignadas a grupos funcionales superficiales tales como C=O, C-O y O-H.

**Figura 1.** Lecturas de IR para Carbón Activado Comercial (a.); C@E (b.); C@TiO<sub>2</sub>, (c.)



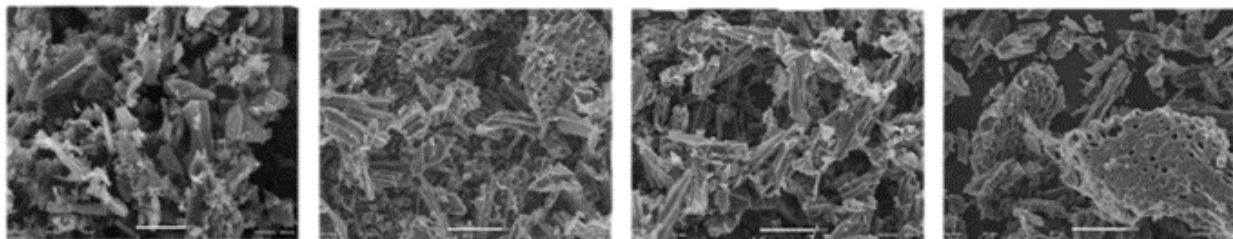
Fuente: Autor, 2024

## 2. ANÁLISIS MORFOLÓGICO COMPARATIVO

El análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló diferencias estructurales entre el carbón activado comercial, el carbón activado experimental (C@E) y el carbón activado con catalizador (C@TiO<sub>2</sub>) antes y después de tres ciclos de uso (C@TiO<sub>2</sub>3). El carbón comercial presentó una estructura cristalina trigonal con fragmentos de 8-100 μm y poros poco definidos. El C@E presentó morfologías mejor definidas con tamaños de 30-300 μm y poros

evidentes de 2-12 μm. Al adicionar el catalizador (C@TiO<sub>2</sub>), se observó una ligera aglomeración carbón-metal, nanopartículas de catalizador dentro y fuera de los poros (<10 μm), y nano-túneles de 8-50 μm preservando los poros internos. Después del tercer ciclo (C@TiO<sub>2</sub>3), se apreciaron aglomerados rígidos de 10-400 μm con poros de 1-10 μm y fragmentos tubulares, reflejando una saturación parcial de poros por el catalizador y subproductos, aunque persistieron poros libres de 2-10 μm en algunas regiones.

**Figura 2.** Evidencia en SEM del carbón activado comercial 20 μm (a.); C@E 50 μm (b.); C@TiO<sub>2</sub> 50 μm (c.); C@TiO<sub>2</sub>3 50 μm (d.)



**Fuente:** Autor, 2024



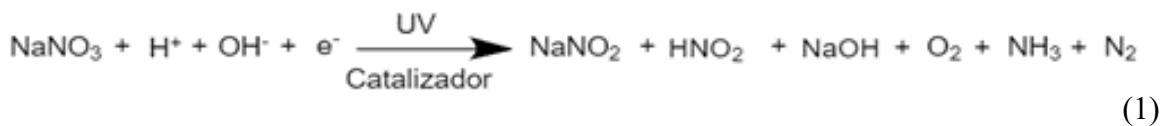
### 3. REDUCCIÓN DE NITRATOS Y FORMACIÓN DE NITRITOS

Se realizaron análisis cuantitativos para la formación de productos nítricos solubles y la disminución de nitratos. Mediante la reacción de Griess, se evidenció la formación de dichos productos nítricos (Bridgewater et al. 2012). Demostrando un aumento exponencial en la concentración de nitritos, pasando de 0 a 163 ppm en el primer ciclo y de 0 a 178,36 ppm en el tercer ciclo tras un lavado.

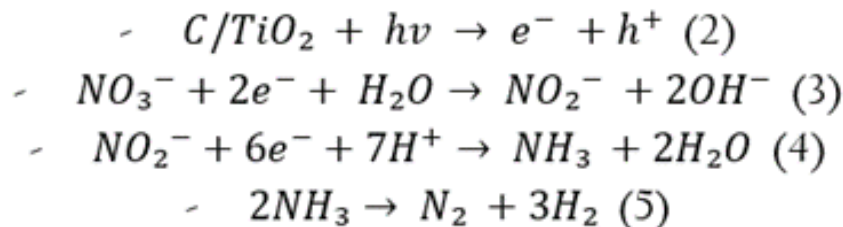
Los análisis según las metodologías del IDEAM (2007) mostraron una disminución en la absorbancia a 220 nm, indicando una

reducción en la concentración de nitratos. Disminuyendo, evidenciando una reducción aproximada del 70% en el primer ciclo y del 75% en el tercer ciclo, con una formación de nitritos de aproximadamente el 15% y 20%, respectivamente (tabla 1).

Sin embargo, investigaciones previas como la de Shaban et. al (2016), sugieren que en sistemas de fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> soportadas en carbón, los nitratos experimentan descomposiciones en cadena como se presenta en las reacciones 2-5, lo cuál resulta favorable en este estudio.



Mecanismo de reacción de Óxido-Reducción del Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>) para la presencia de Nitrato de Sodio en un medio acuoso.



Mecanismo de descomposición del Nitrato propuesto por Yasser et al. (2016)

#### 4. ANÁLISIS COMPARATIVO: FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA VS HOMOGÉNEO

Se evidenciaron diferencias significativas al comparar este proceso heterogéneo soportado con la fotocatalisis homogéneo.

En procesos no soportados, la reducción de nitratos ocurre indiscriminadamente, formando productos nítricos solubles e insolubles. En

contraste, en este proceso soportado sólo se detectó la formación de compuestos nítricos solubles, específicamente ácido nitroso, ya que el carbón activado absorbe los iones sodio favoreciendo su formación exclusiva.

Esto sugiere que la eficiencia en la reducción de nitratos podría ser más favorable en este proceso heterogéneo soportado en comparación con la fotocatalisis homogéneo.

**Tabla 1.** Lecturas de Nitratos y Nitritos por espectrofotometría a 220 nm y 543 nm, comparativa Heterogénea no soportada/Homogénea

Muestra	Catalizador en Fase Homogénea	Ciclo con muestra estándar Fase Heterogéneo soportada (Ciclo 1)**	Ciclo con muestra estándar Fase Heterogéneo soportada (Ciclo 2)***	Ciclo con muestra estándar Fase Heterogéneo soportada (Ciclo 3)****	Leaching del Ciclo 1 con muestra estándar Heterogéneo soportada (Ciclo 1)*****
Concentración de Nitratos Inicial (ppm)	1226,37	1076,81	1076,81	1076,81	1240,81
Concentración de Nitratos Final (ppm)	374,76	311,41	920,20	270,07	1238,36
Concentración de Nitritos Totales Analizados (ppm)	178,23	163,23	30,92	178,36	46,69
Concentración Nitritos no solubles (Fotofiltro), Amoniaco y nitrógeno gaseoso Aproximado (ppm)	673,38	602,17	1032,62	628,38	1180,66

\*Condiciones de Reacción Fase Heterogénea no soportada: Tiempo 1 hora de exposición a luz UVA con el equipo CABINA DE EXTRACCIÓN FLOW 100 H C4 con 5 intervalos de tiempo de estudio y análisis, en Temperatura Ambiente, sin Agitación Mecánica ni Magnética, en ausencia de Luz.

\*\*Condiciones de Reacción Fase Heterogénea: Tiempo 1 hora de exposición a luz UVA con el equipo CABINA DE EXTRACCIÓN FLOW 100 H C4, en Temperatura Ambiente, sin Agitación Mecánica ni Magnética, en ausencia de Luz.

\*\*\*Condiciones de Reacción Fase Heterogénea: Tiempo 1 hora de exposición a luz UVA con el equipo CABINA DE EXTRACCIÓN FLOW 100 H C4, en Temperatura Ambiente, sin Agitación Mecánica ni Magnética, en ausencia de Luz. Sin proceso de limpieza de poros con solución ácida.

\*\*\*\*Condiciones de Reacción Fase Heterogénea: Tiempo 1 hora de exposición a luz UVA con el equipo CABINA DE EXTRACCIÓN FLOW 100 H C4, en Temperatura Ambiente, sin Agitación Mecánica ni Magnética, en ausencia de Luz. Generado un proceso de limpieza en los poros con solución ácida.

\*\*\*\*\*Condiciones de Reacción Fase Heterogénea leaching: Tiempo 1 hora de exposición a luz UVA con el equipo CABINA DE EXTRACCIÓN FLOW 100 H C4, en Temperatura Ambiente, sin Agitación Mecánica ni Magnética, en ausencia de Luz.

Fuente: Autor, 2024



El proceso de fotocatalisis heterogénea soportada (C@TiO<sub>2</sub>) presenta una reducción significativamente mayor de nitratos en comparación con el proceso de fotocatalisis homogénea. Esto se debe a que produce una única forma de nitrito soluble (HNO<sub>2</sub>) y proporciona mayor utilidad, pudiendo implementarse varias veces sin perder el componente fotocatalítico.

Es necesario limpiar el fotofiltro para liberar los poros saturados por los iones de sodio. Esto fortalece la efectividad del proceso al poder emplearse en repetidos ciclos consecutivos, presentando una mayor purificación de nitratos.

## 5. MECANISMO DE REDUCCIÓN DE NITRATOS

Investigaciones previas como la de Shaban et al. (2016) han elucidado el proceso de reducción fotocatalítica de nitratos empleando TiO<sub>2</sub> soportado sobre carbón (C@TiO<sub>2</sub>). Ocurre mediante reacciones que incluyen la formación de nitrito, amoníaco y finalmente nitrógeno molecular (Ecuaciones 2 a 5). La

eficiencia depende de factores como el pH, concentración del catalizador, modificación del soporte carbonoso y el rayo de incidencia de la luz UV.

En este estudio, bajo unas condiciones experimentales, se encontró que las reacciones propuestas por Shaban et al. (2016) son acordes y mejoradas. Aunque no se cuantificaron todos los productos, la detección final de nitritos y nitratos confirmó que se llevó a cabo la desnitrificación, dando cuantificaciones favorables.

Sin embargo, se requieren más estudios sobre la cinética y rendimiento en cada etapa para determinar el punto de quiebre en el que el catalizador ya no cumpla su función primaria y deba cambiarse. No obstante, la evidencia actual valida el mecanismo fotoquímico planteado para la remoción de nitratos y la formación de productos, utilizando C@TiO<sub>2</sub>.

## CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la efectividad de un

novedoso proceso de fotofiltración, integrando fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> soportado en carbón mineral activado, para la reducción de nitratos como posible uso en aguas contaminadas. Los análisis evidenciaron la transformación de aproximadamente el 75% de los nitratos hacia la formación selectiva de productos nítricos solubles, atribuible a la capacidad de adsorción del soporte carbonoso.

Al comparar con procesos homogéneos, la fotofiltración indica una mayor utilidad, siendo posible implementarla varias veces con una limpieza periódica. Si bien se requieren más estudios para confirmar productos finales, este trabajo proporciona evidencia inicial sobre el alto potencial de este prometedor proceso frente a la escasez de agua potable.

### AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) por el apoyo en la investigación realizada. A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDFJC) por los recursos físicos y humanos.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bridgewater, L. American Water Works

Association & Water Environment Federation. (2012). Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. *American Public Health Association* (22).

- Carballo Suárez, L.M. (2002). Introducción a la Catálisis Heterogénea. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D.C. Colombia.
- Directiva 91/271/CEE del consejo del 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- Hallberg, K. B.. et al. (2015). Biological removal of nitrogen from wastewater. *Nature Reviews Microbiology*, 13(11), 661-672.
- Herrmann, J.M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous

- pollutants. *Catalysis Today*, 53(1), 115-129.
- IDEAM. (2007). Determinación de Nitratos en aguas por espectrofotometría UV. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia.
  - Jaramillo, C.A. (2006). Tratamiento de aguas residuales industriales por procesos de oxidación avanzada y fotocatalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub>. Tesis doctoral. Universidad de Tarapacá.
  - Kong, L., et al. (2020). A review of advanced treatment technologies of wastewater by photocatalytic ozonation. *Journal of Environmental Management*, 252, 109631.
  - Lee, J., et al. (2012). Recent progress in the synthesis of porous carbon materials. *Advanced Materials*, 18(16), 2073-2094.
  - López Saucedo, F., et al. (2019). Fundamentos de la filtración en la industria química. *Revista Tecnociencia*, 12(3), 34-48.
  - OMS. (1993). Evaluación de sustancias químicas en los alimentos: principios y métodos. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/37245>
  - ONU. (2017). Objetivo de desarrollo Sostenible.
  - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2022). Contaminantes orgánicos persistentes. Serie sobre el medio ambiente, No. 30. OCDE Publishing: París.
  - Shaban, et al. (2016). Photocatalytic reduction of nitrate in seawater using C/TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Volume 328. Pages 114-121. ISSN 1010-6030. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.05.018>.

- Wu, H., et al. (2018). Highly dispersed platinum supported on nitrogen-doped porous carbon for hydrogen generation from the hydrolysis of ammonia borane. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225, 283-292.