

# Título: Tecnologías solares para la desinfección de agua residual urbana y reutilización en agricultura

M.I. Maldonado Rubio<sup>1\*</sup>, M.I. Polo-López<sup>1</sup>, M. Castro-Alfárez<sup>1</sup>, S. Nahim-Granados<sup>1</sup>, L. Pérez-Estada<sup>1</sup> y P. Fernández-Ibáñez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo red META. Plataforma Solar de Almería (CIEMAT), Plataforma Solar de Almería-CIEMAT, Ctra. de Senés Km.4, 04200 Tabernas, Almería.

mignacio.maldonado@psa.es

## Resumen

El tratamiento, regeneración y reutilización de efluentes secundarios de EDAR promete ser una vía para aliviar ciertos problemas de escasez de agua dulce. No obstante, estos efluentes presentan ciertos niveles de contaminación tanto química como microbiológica y por tanto no son aptos para su uso en ninguna actividad. Por ello, el uso de un tratamiento terciario adecuado es necesario para poder recuperar de manera segura esta fuente de agua dulce. A nivel nacional esta actividad se regula a través del Real Decreto de Reutilización 1620/2007 (RD 1620/2007), cuyo objetivo es establecer el régimen jurídico para la reutilización de aguas depuradas, y los límites de calidad en función del destino final del agua tratada: urbano, industrial, agrícola o recreativo. De todos ellos, la agricultura se considera uno de los focos potenciales para el reúso de efluentes de EDAR dado el alto consumo de agua que se requiere para la producción de frutas y hortalizas.

Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO) han demostrado una elevada capacidad de reducción de carga contaminante tanto química como microbiológica en diferentes tipos de agua contaminada. Estos procesos se caracterizan por generar especies altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) cuya baja especificidad y elevado potencial redox favorece su reacción con casi cualquier compuesto orgánico, llegando incluso a la completa mineralización del mismo. En esta contribución se presentan resultados experimentales de inactivación de microorganismos presentes en efluente secundario de EDAR con foto-Fenton y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (concentraciones sub-tóxicas) asistido por radiación solar. Todos los resultados experimentales se han obtenido en una planta piloto tipo CPC (Captador Parabólico Compuesto). El agua residual una vez tratada se utilizó para el riego de cultivos de corta duración y de consumo en crudo (lechugas) con el objeto de evaluar la seguridad microbiológica del uso de estos tratamientos para el reúso en agricultura.

**Palabras Clave:** Captador Parabólico Compuesto, Efluente de EDAR, *Escherichia coli*, Foto-Fenton, Radiación solar

## Introducción

La escasez de agua es un problema extendido a nivel mundial especialmente en áreas con alta insolación y periodos de reducidas precipitaciones. Es por ello que en la última década la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de agua dulce ha llevado a diferentes países como España, Italia, Jordania, etc. a proponer la recuperación del agua de salida de EDAR como una vía para reducir la escasez hídrica y establecer regulaciones y normativas respecto a esta actividad. En España, la reutilización del agua residual urbana se regula a través del Real Decreto de Reutilización 1620/2007 (RD 1620/2007), donde se establecen los límites máximos permitidos en distintos parámetros microbiológicos y físico-químicos que el agua tratada debe cumplir para ser reutilizada en diferentes sectores/actividades. Esto se debe al hecho de que esta fuente de agua dulce no es apta para muchas actividades tales como usos urbanos, domésticos, industriales y riego en agricultura sin un tratamiento previo debido a los altos

niveles de contaminación tanto química como microbiológica que presentan. Por ello es imprescindible la incorporación de un tratamiento terciario que permita alcanzar niveles seguros para evitar problemas de salud medioambiental.

En las últimas décadas, los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO) han demostrado una elevada capacidad de reducción de carga contaminante tanto química como microbiológica de diferentes fuentes de agua (Malato y cols., 2009). Entre los PAO que emplean radiación solar natural como fuente de fotones destaca la fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y fotocatalisis homogénea con foto-Fenton, procesos que han demostrado una alta eficiencia en la inactivación de diferentes tipos de microorganismos presentes en efluentes de EDAR tales como *Escherichia coli*, coliformes, *Enterococcus faecalis*, hongos fitopatógenos, etc. (Polo-López y cols., 2012; Agulló-Barceló y cols., 2013; Rodríguez-Chueca y cols., 2014). Otro proceso solar que también es de alto interés en desinfección de agua por su elevada eficiencia demostrada y su relativo bajo coste es el tratamiento combinado de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y luz solar (Bichai y cols., 2012).

En esta contribución se presentan resultados experimentales de desinfección de agua residual de salida de EDAR con los tratamientos de foto-Fenton y  $\text{H}_2\text{O}_2$  utilizando radiación solar natural como fuente de fotones. Todos los resultados experimentales se han realizado en planta piloto CPC en la Plataforma Solar de Almería (PSA). El agua tratada mediante los citados procesos solares se utilizó para el riego de plantas de consumo en crudo, en particular el cultivo de lechuga, evaluando posteriormente la presencia/ausencia de microorganismos patógenos en la superficie de las hojas de lechuga.

### **Materiales Y Métodos**

El efluente de agua residual urbana utilizado procede de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales El Bobar, (Almería, España). Las principales características de este efluente son: pH 7, turbidez 10-20 NTU, conductividad 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Carbono Orgánico Disuelto (COD) 20-30 mg/L. La desinfección del agua residual se evaluó mediante el seguimiento de la concentración de diferentes tipos de bacterias presentes de manera natural en este tipo de agua: *E. coli*, coliformes totales y *E. faecalis*. La concentración de bacterias se determinó mediante la técnica de recuento en placa con medios selectivos: Chromocult® (Merck KGaA, Darmstadt, Alemania) para *E. coli* y coliformes totales; y Slanetz-Bartley para *E. faecalis*. El recuento de colonias se realizó tras el correspondiente periodo de incubación. El límite de detección (LD) en todos los casos es 2 CFU/mL.

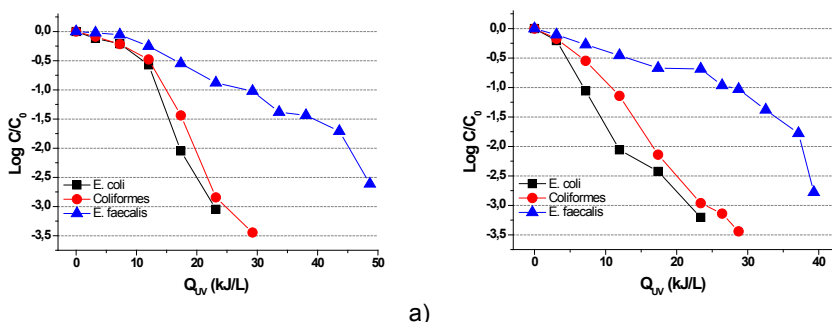
El protocolo de análisis de presencia/ausencia de microorganismos en cultivo de lechuga se realizó en base a trabajos previos (Bichai y cols., 2012; Ferro y cols., 2015). Brevemente consiste el análisis de 15 muestras tomadas al azar de todo el cultivo (100 macetas/plantas por tratamiento). Cada muestra consiste en la selección de 3 gramos de hoja que posteriormente se trocea en pequeñas piezas de ~ 5 mm. Las muestras así preparadas se le adicionan 10 mL de solución salina y se someten a un proceso de trituración y homogenización (5 minutos a 260 rpm) en Stomaquer (SEWARD, modelo 400 circulator). La presencia/ausencia de microorganismos en cada muestra se determinó mediante la técnica de cultivo en placa utilizando los medios selectivos citados anteriormente.

El reactor solar CPC utilizado para realizar el tratamiento del agua de salida de EDAR consiste en 2 módulos de 10 tubos de vidrio de borosilicato/módulo con espejo de aluminio anodizado CPC dispuestos sobre una plataforma de aluminio inclinada  $37^\circ$  sobre la horizontal. El volumen total de agua tratada es de 60 L, el volumen iluminado del reactor es de 45 L. La superficie iluminada de este reactor es de 4.5  $\text{m}^2$  (Polo-López, 2010). El caudal de agua utilizado fue de 30 L/min. Los experimentos se realizaron en días completamente soleados, con un promedio de radiación UVA solar de 36  $\text{W}/\text{m}^2$ . La radiación UVA solar se mide con un piranómetro de UVA global (300–400 nm, Modelo CUV5, Kipp & Zonen, Netherlands) inclinado  $37^\circ$ . Los datos de radiación UVA incidente se obtienen en  $\text{W}/\text{m}^2$ , que indica la cantidad de energía UVA solar incidente por unidad de superficie. Los resultados de inactivación se muestran en función de la

energía acumulada por unidad de volumen recibida en el reactor ( $Q_{UV}$ , kJ/L). Este parámetro se utiliza comúnmente para comparar resultados realizados bajo diferentes condiciones de radiación solar y distintos reactores solares (Polo-López, 2010). La concentración de  $H_2O_2$  (30% W/v) (Riedel-de Haën, Germany) en las muestras de agua se determinó mediante colorimetría basada en la utilización de titanio(IV) oxisulfato (Riedel-de Haën, Alemania). Como fuente de  $Fe^{2+}$  se utilizó sulfato de hierro heptahidrato ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , PANREAC, Spain). Las medidas de concentración de hierro total se realizaron de acuerdo a la norma ISO 6332.

### Resultados y Discusión

La figura 1 representa la inactivación de *E. coli*, *E. faecalis* y coliformes totales presentes de forma natural en efluentes de EDAR con el tratamiento de foto-Fenton solar (10 mg/L- $Fe^{+2}$ : 20 mg/L- $H_2O_2$ ) a pH neutro (Fig. 1a) y  $H_2O_2$ /Solar (20 mg/L) (Fig. 1b) en reactor CPC de 60 L. En general, con ambos tratamientos se obtuvieron resultados satisfactorios de inactivación ya que en todos los casos se alcanzó el límite de detección (2 CFU/mL). Comparando ambos tratamientos solares, se observa que no existen diferencias significativas en términos de eficiencia de inactivación microbiana, resultados se han observado en otros trabajos experimentales de foto-Fenton llevados a cabo a un pH cercano a la neutralidad (García-Fernández y cols., 2012; Rodríguez-Chueca y cols., 2014). Esta similitud en términos de eficiencia entre ambos procesos solares se debe a la elevada pérdida de hierro que se produce en el tratamiento de foto-Fenton a pH básico, como es el caso del agua de salida de EDAR (~7.5-8). A este pH el hierro precipita rápidamente en forma de oxihidróxidos cuya capacidad fotocatalítica está muy reducida comparada con el hierro en disolución que se mantiene al pH óptimo para la máxima solubilidad del hierro, es decir, 2.8 (Polo-López y cols., 2012; Rodríguez-Chueca y cols., 2014). Las medidas de Fe inicial disuelto en este trabajo experimental fue de 0 mg/L, lo cual demuestra que todo el hierro añadido (10 mg/L) precipitó desde el inicio del experimento. Es por ello que la eficiencia de inactivación en este caso se puede atribuir principalmente al efecto del  $H_2O_2$  añadido, como demuestra la semejanza entre ambos tratamientos, donde se trabajó con la misma concentración de  $H_2O_2$  (20 mg/L). La elección de llevar a cabo el tratamiento de foto-Fenton solar a pH cercano a la neutralidad se debe principalmente a la necesidad de reducir los costes de operación del tratamiento al eliminar el pre- and post-acondicionamiento del agua, es decir, acidificación para el tratamiento y neutralización para el vertido.



**Figura 1.** Inactivación de *E. coli*, *E. faecalis* y coliformes totales presentes de forma natural en efluente de EDAR con los tratamientos de foto-Fenton solar (10-20 mg/L  $Fe^{2+}$ - $H_2O_2$  a pH neutro) (a) y  $H_2O_2$ /Solar (20 mg/L) (b) en reactor CPC de 60L.

El efluente de EDAR tratado mediante ambos procesos se utilizó para el riego de cultivo de lechugas en invernadero experimental. El periodo de riego del cultivo duró 2.5 meses, desde la germinación de las semillas hasta la obtención del producto. Durante este periodo, se regaron 100 macetas/tratamiento con 50 mL de agua. Los resultados obtenidos de 15 muestras de lechuga tomadas al azar de todo el cultivo y regadas con agua de salida de EDAR tratada con foto-Fenton y  $H_2O_2$ /solar revelaron la no presencia de *E. coli*, coliformes totales y *E. faecalis* en

ninguna muestra analizada. Estos resultados demuestran la capacidad de los tratamientos solares para la desinfección de agua de salida de EDAR, además del no recrecimiento de los citados microorganismos sobre la superficie de las hojas de lechuga durante el periodo de cultivo/riego. Simultáneamente, se evaluaron dos tipos de controles del propio procedimiento experimental. Estos consistieron en el riego de 100 macetas de lechuga con agua mineral (control negativo de presencia de microorganismos) y otras 100 macetas regadas con efluente de EDAR sin tratar (control positivo de presencia de microorganismos). Los resultados de los controles demostraron la presencia de patógenos en el caso del control positivo y la ausencia total en el caso del control negativo. Estos resultados validan el procedimiento experimental y aseguran que la no detección de patógenos en el agua tratada se debe a la ausencia total en el agua de riego tratada.

## Conclusiones

Los resultados experimentales de este trabajo demuestran que microorganismos patógenos presentes en efluentes de EDAR, tales como *E. coli*, *Enterococcus* y coliformes totales son satisfactoriamente inactivados mediante los procesos solares de foto-Fenton y  $H_2O_2$  a escala de planta piloto usando un reactor solar CPC de 60 L.

De los dos tratamientos solares evaluados, se puede considerar que el tratamiento solar de  $H_2O_2$  a bajas concentraciones de reactivo (20 mg/L) es la mejor opción de tecnología de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de patógenos.

El análisis microbiológico de muestras de hojas de lechuga regadas con efluente de EDAR tratado con tecnologías solares ha demostrado que estos tratamientos son una opción segura ya que evitan la transferencia de microorganismos patógenos, reduciendo el riesgo de contagio de enfermedad debido a contaminación cruzada y posterior consumo en crudo de este tipo de cultivo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo en el proyecto WATER4CROP (CTQ2014-54563-C3).

## Referencias

1. Agulló-Barceló M., Polo-López M.I., Lucena F., Jofre J. and Fernández-Ibáñez P. (2013). Solar Advanced Oxidation Processes as disinfection tertiary treatments for real wastewater: Implications for water reclamation. *App. Catal. B: Environ.* 136–137, 341–350.
2. Bichai F., Polo-López M.I., and Fernández Ibáñez P. (2012). Solar disinfection of wastewater to reduce contamination of lettuce crops by *Escherichia coli* in reclaimed water irrigation. *Water Research* 46, 6040–6050.
3. Ferro G., Polo-López M.I., Martínez-Piernas A.B., Fernández-Ibáñez P., Agüera A. and Rizzo L. (2015). Cross-Contamination of Residual Emerging Contaminants and Antibiotic Resistant Bacteria in Lettuce Crops and Soil Irrigated with Wastewater Treated by Sunlight/ $H_2O_2$ . *Environ. Sci. Technol.* 49, 11096–11104.
4. García-Fernández I., Polo-López M.I., Oller I., and Fernández-Ibáñez P. (2012). Bacteria and fungi inactivation using  $Fe^{3+}$ /sunlight,  $H_2O_2$ /sunlight and near neutral photo-Fenton: A comparative study. *Appl. Catal., B.* 121–122, 20–29.
5. Malato S., Fernández-Ibáñez P., Maldonado M.I., Blanco J. and Gernjak W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catal. Today*, 147, 1–59.
6. Polo-López M.I., Fernández-Ibáñez P., García-Fernández I., Oller I., Salgado-Tránsito I. and Sichel C. (2010). Resistance of *Fusarium* sp spores to solar  $TiO_2$  photocatalysis: influence of spore type and water (scaling-up results). *J. Chem. Tech. & Biotech.* 85, 1038–1048.
7. Polo-López M.I., García-Fernández I., Velegriki T., Katsoni A., Oller I., Mantzavinos D., and Fernández-Ibáñez P. (2012). Mild solar photo-Fenton: An effective tool for the removal of *Fusarium* from simulated municipal effluents. *Appl. Catal., B.* 111–112, 545–554.
8. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, BOE n° 294, 2007.
9. Rodríguez-Chueca J., Polo-López M.I., Mosteo R., Ormad M.P., and Fernández-Ibáñez P. (2014). Disinfection of real and simulated urban wastewater effluents using a mild solar photo-Fenton. *Appl. Catal., B.* 150–151, 619–629.