




Tratamiento solar de aguas en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España): Integración de tecnologías para la regeneración de aguas residuales y producción fotocatalítica de hidrogeno

Isabel Oller-Alberola¹ , María I. Polo-López¹, Sixto Malato-Rodríguez¹  & Samira Nahin-Granados¹ 

¹ Plataforma Solar de Almería – CIEMAT – España.

ACCESO  ABIERTO

Para citaciones: Oller alberola, I, Polo López, M., Malato Rodríguez, S., & Nahin Granados, S. (2022). Tratamiento solar de aguas en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España): Integración de tecnologías para la regeneración de aguas residuales y producción fotocatalítica de hidrogeno. *Ing-NOVA*, 7(1), 121-135.

<https://doi.org/10.32997/rin-2022-3731>

Recibido: 09 de agosto 2021

Revisado: 09 de noviembre 2021

Aprobado: 11 de noviembre 2021

Autor de correspondencia:

Isabel Oller-Alberola

isabel.oller@psa.es

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2022. Oller alberola, I, Polo López, M., Malato Rodríguez, S., & Nahin Granados, S. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

Uno de los efectos más impactantes derivados del Cambio Climático es el incremento de la temperatura así como la consecuente escasez hídrica que sufren algunos países a nivel mundial. De forma paralela, aquellas zonas del planeta que tienen abundancia de agua, sin embargo, presentan una muy mala calidad de la misma, se ven obligadas a aplicar tratamientos específicos dependiendo del uso final de dicho recurso natural. Además, hay que sumar el hecho de que el crecimiento exponencial de la población mundial lleva a la humanidad a la necesidad de aumentar el consumo de agua para mantener la sociedad del bienestar en algunos países, o simplemente, garantizar la provisión de alimentos y energía a dicha creciente población. Frente a este trágico panorama surge la necesidad de investigar y desarrollar nuevas tecnologías y/o combinación de técnicas ya conocidas para la generación de nuevas fuentes de agua. En este sentido, la Unidad de investigación de Tratamiento Solar de Aguas en la Plataforma Solar de Almería (PSA), centro perteneciente al CIEMAT (Tabernas, Almería, España), lleva más de 30 años investigando la aplicación de tecnologías solares al tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales para su posterior reutilización. Además, entre las líneas de investigación que se desarrollan en este grupo cabe destacar aquella enfocada en la producción fotocatalítica de hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles que se lleva a cabo a escala planta piloto de forma única e innovadora.

Palabras clave: Contaminantes de preocupación emergente; Desinfección solar; Fotocatálisis; Foto-Fenton; Foto-reactores solares; Genes resistentes a antibióticos.

Solar water treatment at the Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, Spain): Integration of technologies for the regeneration of wastewater and photocatalytic hydrogen production

ABSTRACT

One of the most important effects derived from Climate Change is the increase of the environmental temperature as well as the consequent water shortage suffered by some

¹ Plataforma Solar de Almería – CIEMAT, Ctra. de Senés km4.5, 04233, Tabernas, Almería, España.

countries worldwide. At the same time, those areas of the planet that have an abundance of water, however, present a very poor quality of the same that forces to apply specific treatments depending on the final use of such natural resource. In addition, it must be added the fact that the exponential growth of the world population leads humanity to the need to increase water consumption to maintain the welfare society in some countries, or simply to guarantee the provision of food and energy to the growing population. Faced with this tragic panorama, the requirement to investigate and develop new technologies and / or a combination of techniques already known, arises for the generation of new sources of water. In this sense, the Solar Treatment of Water Research Unit at the Plataforma Solar de Almería (PSA), a centre belonging to CIEMAT (Tabernas, Almería, Spain), has been investigating, for more than 30 years, the application of solar technologies to urban and industrial wastewater treatment for subsequent reuse. In addition, among the research lines developed in this group, it is worth highlighting the one focused on the photocatalytic production of hydrogen as an alternative to fossil fuels that is carried out at a pilot plant scale in a unique and innovative way.

Keywords: Pollutants of emerging concern; Solar disinfection; Photocatalysis; Photo-Fenton; Solar Photo-reactors; Antibiotic resistant genes.

1. Introducción

El agua constituye un recurso necesario para la vida. Sin embargo el agua se ha convertido en un valor patrimonial singular, siendo utilizada para la higiene y para consumo humanos, para el desarrollo de actividades recreativas, para el riego de cultivos y la realización de actividades industriales así como para la producción de energía. Por su relevancia, la preservación de la fuente y el correcto manejo de este elemento deben ser tratados con cuidado y de forma sostenible, teniendo en cuenta todas las perturbaciones que las actividades humanas causan sobre las mismas. En este contexto y con el objetivo de preservar la integridad de los recursos hídricos, las Naciones Unidas (ONU) declara el Objetivo de Desarrollo Sostenible nº6: "garantizar la disponibilidad y gestión del agua y saneamiento para todos". Para el seguimiento de la consecución de este objetivo ONU-Agua recopila datos proporcionados por los países que participan en la iniciativa dentro de 11 indicadores globales, pudiendo rastrearlos y así crear una línea base para comparar y seguir los avances hacia usos más sostenibles del agua.

A través de los informes emitidos a las autoridades pertinentes, se ha demostrado la escasez de agua provocada por el aumento del consumo por un incremento exponencial de la población mundial, así como un efecto asociado al cambio climático. Además, no sólo los altos niveles de estrés hídrico detectados en países de la Cuenca del Mediterráneo y del sur de Europa, sino la mala calidad del agua procedente de países del norte de Europa también acrecienta la preocupación de la sociedad en su conjunto.

En este contexto, la búsqueda de nuevas fuentes de agua se convierte en una prioridad con el objetivo de disminuir el nivel de estrés hídrico y mejorar la calidad del agua disponible, por lo que se han propuesto nuevas formas de obtener agua potable, así como de diferente calidad para actividades económicas tales como la agrícola y producción de alimentos. Tanto las técnicas de desalinización como las de tratamiento y reutilización de aguas residuales urbanas se han convertido en las fuentes alternativas y sostenibles de agua más atractivas de cara a paliar esta problemática. En líneas generales, las tecnologías comerciales que actualmente se emplean para la desalinización (ósmosis inversa) hacen que su coste sea elevado en comparación con los asociados a los tratamientos de depuración y reutilización de aguas residuales. Sin embargo, la combinación entre ambas fuentes de agua ofrece la mejor alternativa para núcleos de población elevados.

El punto crítico en este concepto es el tratamiento aplicado al agua residual y las características físicoquímicas que debe presentar el agua tratada para su reutilización, las cuales, en España, están recogidas y reguladas en el RD1620/2007.

A nivel europeo, la Directiva marco del agua (2000/60/CE) se concibe como el principal cuerpo legal en materia de agua que contiene una serie de las llamadas "Estrategias contra la contaminación del agua", señalando las pautas a seguir para garantizar la calidad del agua en todos los países de la UE. Recientemente, el Parlamento Europeo y el Consejo han publicado el nuevo Reglamento UE 2020/741 (5 de junio de 2020) sobre los requisitos mínimos para la reutilización del agua principalmente para riego de cultivos.

Este Reglamento, que será de obligado cumplimiento a partir del 26 de junio de 2023 en todos los Estados miembros, establece los límites de calidad que debe de cumplir el agua regenerada para el riego de diferentes tipos de cultivos y árboles para producción alimentaria.

Entre los parámetros que se emplean para definir la calidad del agua que se quiere tratar y/o reutilizar, se encuentran diversos contaminantes químicos y microbiológicos. Los productos químicos son parte esencial de nuestra vida, presentando, algunos de ellos, riesgos muy importantes para los diferentes ecosistemas que conforman el medio ambiente. Los productos químicos pueden llegar a las aguas naturales por diferentes caminos: descarga directa desde la industria o agricultura, consumo propio en humanos y tratamiento de enfermedades en animales, entre otros. Sin embargo, el aumento de la población, el cambio de sus perfiles de consumo y la utilización de sustancias cada vez más complejas en la vida diaria, son aspectos que se relacionan con el paulatino incremento de concentración de compuestos cuya peligrosidad

comienza a evidenciarse, y que se conocen ampliamente como “contaminantes de preocupación emergente” (CECs, siglas en inglés) [1],[2].

En este sentido, existe también una creciente preocupación por el desarrollo de microorganismos patógenos multirresistentes a los fármacos más empleados por la población mundial [3]. El problema es de tal magnitud que la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado recientemente una primera lista de «patógenos prioritarios» resistentes a los antibióticos [4], para incentivar a la investigación y desarrollo de nuevos fármacos que puedan combatirlos. Los sistemas convencionales de depuración biológica de aguas residuales no son eficaces en la eliminación de estos compuestos de preocupación emergente (plaguicidas, residuos industriales, fármacos) que imposibilitan, en su caso, el re-uso del agua tratada [5].

Los tratamientos convencionales suelen basarse en procesos físicos como la filtración y radiación UV-C, y químicos como la cloración y la ozonización. Todos ellos presentan aspectos negativos como es el alto coste de mantenimiento e instalaciones, la colmatación de filtros y/o la falta de efecto desinfectante residual, primordial cuando se desea almacenar o transportar el agua para su reúso. En el caso de la cloración y ozonización, la principal desventaja es la formación de productos de desinfección potencialmente mutagénicos en presencia de materia orgánica natural en el agua [6], [7]. Y en la agricultura, se utilizan normalmente compuestos químicos que pueden acumularse en el subsuelo y generar fitotoxicidad o resistencias. Por ello, en la actualidad se investiga la aplicación de otras tecnologías de tratamiento terciario y/o integración de tratamientos con el objeto de resolver las posibles limitaciones de los sistemas tradicionales considerando dos pilares principales: coste y eficiencia. En este sentido, el único país que, por el momento, ha hecho un gran esfuerzo para actualizar todas sus depuradoras e incluir sistemas terciarios de ozonización y carbón activado es Suiza.

Las alternativas tecnológicas más estudiada en los últimos años, normalmente formando diferentes combinaciones, incluso con algunas convencionales, son los procesos avanzados de oxidación (PPAO) que pueden definirse, de manera general, como procesos de oxidación en fase acuosa o gaseosa basados en la acción de especies altamente reactivas como los radicales hidroxilo (principalmente, aunque se generan otros radicales oxigenados) que conducen a la destrucción de las moléculas contaminantes. Estos radicales son inestables y deben producirse continuamente mediante reacciones químicas o fotoquímicas. Los radicales hidroxilo poseen un potencial de oxidación ($E_0 = 2,80 \text{ V}$) mayor que los oxidantes clásicos (fluroine, oxone, ozone, hydrogen peroxide, etc. [8], y reaccionan con los compuestos orgánicos, principalmente oxidando los enlaces C-H, N-H u O-H, mediante adición a enlaces C=C o adición a anillos aromáticos y por

transferencia de electrones [9-11]. De entre todos los PPOA, aquellos que son capaces de aprovechar la radiación solar son de especial interés por su carácter sostenible y renovable [12].

Los PPAO activados por radiación solar han demostrado una alta eficiencia tanto para inactivación de microorganismos como para degradación de contaminantes químicos, eficiencia potenciada gracias a la combinación con reactores diseñados para aumentar la captación de fotones solares. Estos son los conocidos como Captadores Parabólico Compuestos (CPC). Estos reactores se desarrollaron en los años 80 y su objetivo es redirigir toda la radiación solar incidente en la apertura del espejo CPC al foto-receptor, iluminando toda la circunferencia del tubo receptor e incrementando la eficiencia de los tratamientos fotoquímicos. Estos captadores no concentran la radiación solar ni requieren de ningún sistema automático de seguimiento solar. Además, se trata de tecnología muy eficaz, sencilla, de relativo bajo coste y de fácil manejo [8].

Recientemente, se ha desarrollado la aplicación de procesos de fotocatalisis homogénea tipo foto-Fenton solar y UV/H₂O₂ en un tipo de foto-reactores abiertos conocidos como "raceway" (cuyas siglas en inglés son RPR, raceway pond reactor) [13]. La viabilidad de este tipo de reactores que tradicionalmente se han venido usando de manera comercial para el cultivo de microalgas [14], se ha demostrado ampliamente también para la recuperación de efluentes urbanos, tanto en la eliminación de micro-contaminantes [11], como en la desinfección de aguas residuales [15]. Estos reactores tienen un bajo coste de construcción y sus características físicas (canales diseñados para la circulación de agua impulsada por paletas) y operacionales permiten tratar grandes volúmenes de agua variando la profundidad del líquido.

El grupo de investigación de tratamientos solares del agua (TSA) de la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España) tiene como objetivo la investigación y desarrollo de este tipo de tecnologías y su integración con otras convencionales y avanzadas para tratar de dar solución a la problemática de escasez hídrica y mala calidad del agua. La unidad TSA está enfocada, por tanto, en el desarrollo de I+D+i centrada en la utilización de la radiación solar para procesos fotoquímicos a temperatura ambiente.

El objetivo fundamental de la Unidad TSA es la aplicación de estas líneas de investigación en: Evaluación de nuevos fotocatalizadores; Tratamientos de aguas residuales industriales; Eliminación de micro-contaminantes; Potabilización y desinfección de aguas; Producción de hidrógeno y otros foto-combustibles; Reutilización de agua en agricultura; Recuperación de nutrientes presentes en aguas residuales.

2. Instalaciones

Desde 1994 se han diseñado y construido varias plantas piloto tipo CPC en las instalaciones del grupo TSA en la Plataforma Solar de Almería (PSA) (Figura 1). Las plantas piloto solares se han construido mediante módulos que se pueden conectar en serie. Cada módulo consta de una serie de foto-reactores colocados en el foco de un espejo de aluminio anodizado con forma de CPC para optimizar la recogida de fotones solares en el tubo del foto-reactor [16]. Los módulos se colocan en una plataforma inclinada 37° desde la horizontal (latitud local de la PSA) para maximizar la colección solar global de fotones a lo largo del año [17].

Además, las plantas piloto no solamente están automatizadas contando con sondas de medida de oxígeno disuelto, pH y temperatura, sino que además están equipadas y combinadas a otros sistemas agregados para diferentes propósitos, por ejemplo: tanques de sedimentación (para recuperación de catalizador), sistemas de calefacción y enfriamiento para control de temperatura durante los experimentos, combinación con tratamientos biológicos, membranas de nanofiltración, ozonización, celdas electrolíticas combinadas con CPC, lámparas de UVC, etc. De esta manera, en el grupo de investigación, se pueden llevar a cabo comparaciones e integración de diferentes tecnologías, avanzadas y convencionales, de cara a dar la mejor solución posible (desde el punto de vista técnico y económico) para diferentes problemáticas de depuración de aguas residuales tanto industriales como urbanas, centrándose en la reutilización de estas últimas en riego de cultivos gracias a un invernadero experimental del que también se dispone. Se trata de cuatro cámaras de cultivo de 3 x 2.5 m² de superficie individual, equipadas cada una con sensores de humedad y sistemas de calentamiento y enfriamiento. El techo de cada cámara se encuentra a 2.5 m de altura y puede abrirse como una ventana que automáticamente favorece la circulación de aire dentro de cada área mejorando, por tanto, el control de temperatura en su interior.

Junto con estas instalaciones a escala planta piloto, el grupo TSA dispone también de equipamiento a escala de laboratorio, como son dos simuladores solares provistos de lámparas de xenón para experimentos de descontaminación y desinfección de agua a pequeña escala. En ambos sistemas, la intensidad de la radiación se puede modificar y controlar. La temperatura también se puede modificar y controlar mediante un sistema de refrigeración.

Cabe destacar, además, la incorporación al equipamiento a escala piloto de este grupo de investigación, de una planta de producción fotocatalítica de hidrógeno, única a nivel mundial. Esta planta está compuesta por un tanque

cerrado de acero inoxidable de 22 L conectado a un fotorreactor tipo CPC para la eliminación simultánea de contaminantes orgánicos de soluciones acuosas y generación de hidrógeno. Se utilizan dos controladores de flujo másico en paralelo para controlar el flujo de gas N_2 deseado en el espacio en cabeza del reactor durante la eliminación de O_2 para lograr las condiciones de reducción, así como para arrastrar el hidrógeno producido. Se utiliza una bomba centrífuga con un caudal de 20 L/min para recircular la suspensión acuosa del tanque a los tubos del CPC. El fotorreactor está compuesto por 16 tubos de vidrio Pyrex (diámetro interior 28,5 mm, diámetro exterior 32 mm, longitud irradiada 1401 mm) con un área total y volumen irradiado de 2,1 m² y 14,3 L, respectivamente.

Además y teniendo en cuenta la gran actividad del grupo de investigación TSA en el campo del tratamiento y reutilización de aguas, éste cuenta con un moderno y completo laboratorio de análisis de aguas equipado con los principales sistemas de análisis y caracterización físico-química y microbiológica de muestras acuosas. Entre los sistemas analíticos más sofisticados cabe destacar el analizador de Carbono Orgánico Total (TOC) y cromatógrafos iónicos para analizar cationes, aniones, aminas y ácidos carboxílicos. El seguimiento de la degradación de contaminantes de preocupación emergente se realiza mediante cromatografía líquida (HPLC-DAD y UPLC-DAD) alcanzando límites de cuantificación inferiores a 10 ng/mL. Respecto a los análisis de desinfección, se cuenta con los sistemas auxiliares básicos y necesarios para tal fin, incluyendo varias cabinas de bioseguridad, incubadores estáticos y orbitales, autoclaves, etc., para llevar a cabo técnicas de cuantificación mediante extensión en placa y filtración, utilizando medios selectivos y diferenciales de diversos tipos de bacterias, virus y hongos. Además, se llevan a cabo análisis genéticos en algunas de las líneas de investigación, y para ello se cuenta con un equipo de análisis de PCR (Polymerase Chain Reaction) en tiempo real.



(a)



(b)

Figura 1. a) y b) Vistas generales de los fotorreactores tipo CPC disponibles en las instalaciones del grupo de investigación TSA en PSA (Tabernas, Almería, España).

Toda esta información se encuentra detallada en el informe anual de la Plataforma Solar de Almería publicado en su web [<http://www.psa.es/es/techrep/index.php>]

3. Líneas y proyectos de investigación

Las principales líneas de investigación que se desarrollan en el grupo de investigación TSA en la PSA se enumeran a continuación:

1. Mejora y optimización de foto-reactores solares, tanto para aplicaciones de descontaminación, desinfección y producción fotocatalítica de combustibles para diferentes tipos de aguas residuales y localizaciones geográficas.
2. Nuevas tecnologías basadas en combinación de procesos reductivos y oxidativos en fase heterogénea para la eliminación de contaminantes especialmente complejos y resistentes.
3. Combinación de procesos avanzados de oxidación con otras tecnologías innovadoras para tratamiento, desinfección y reutilización (riego y procesos industriales) de todo tipo de aguas residuales.
4. Producción de combustibles y fotosíntesis artificial mediante fotocatalisis solar. Utilización de la radiación solar para promover reacciones fotocatalíticas con el objetivo de producir hidrógeno a partir de agua o bien combustibles a partir de CO₂.

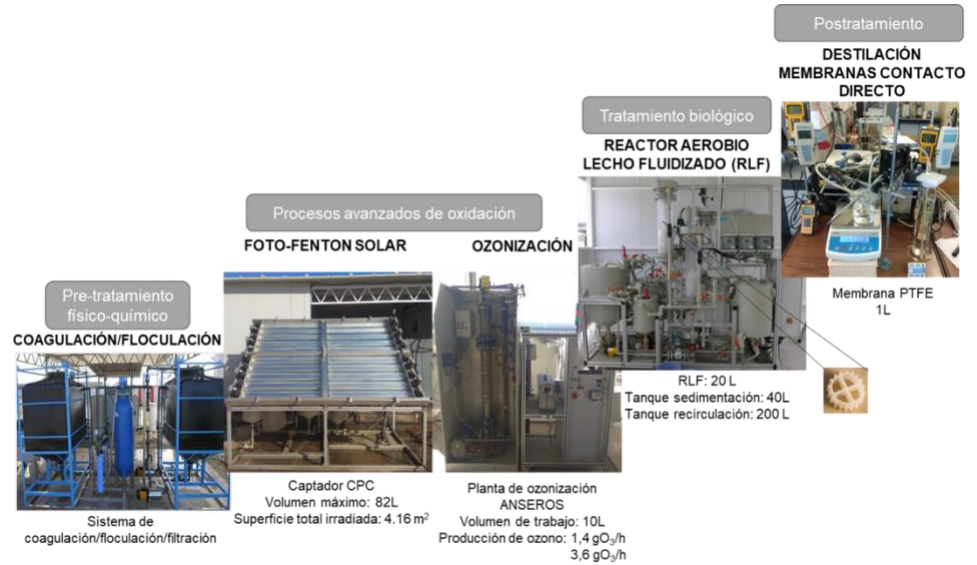


Figura 2. Ejemplo de integración de tecnologías convencionales y avanzadas para el tratamiento de un agua residual industrial con equipamiento a escala de laboratorio y piloto disponible en las instalaciones del grupo de investigación TSA en PSA (Almería, España).



Figura 3. Reactor para producción fotocatalítica de hidrógeno a partir de agua residual a escala planta piloto disponible en las instalaciones del grupo de investigación TSA en PSA (Almería, España).

5. Valorización de residuos. Aplicación de tecnologías de membranas y procesos de cristalización innovadores para lograr la recuperación de nutrientes tales como fosfato, nitrato, amonio, etc., para su posterior aprovechamiento en actividades agrícolas.

Todas las líneas de investigación se desarrollan a partir de la participación de miembros del grupo de investigación TSA en diferentes proyectos a escala nacional, europea e internacional. De forma específica a continuación se detallan las actividades llevadas a cabo en el marco de los proyectos nacionales, financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno Español, CALYPSOL y NAVIA.

4. Proyecto CALYPSOL (Tecnologías avanzadas para eliminación de contaminantes y revalorización de diferentes aguas residuales)

El proyecto CALYPSOL, financiado por Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), AEI y FEDER, y que tiene como objetivo general la aplicación de tecnologías avanzadas e híbridas para abordar la eliminación de contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos tanto en aguas residuales como en efluentes municipales, se divide en tres subproyectos que se llevan a cabo en coordinación con la Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Alcoy) y la Universidad Rey Juan Carlos (Madrid).

Los principales tratamientos estudiados (a escala de laboratorio y piloto) son: la combinación de procesos reductores y oxidativos para la degradación de contaminantes resistentes a la oxidación por procesos avanzados; la generación de hidrógeno mediante procesos reductores; hierro cero valente (ZVI); oxidación de As(III) y contaminantes orgánicos con fotocatalizadores basados en dióxido de titanio y nitruros de carbono grafitico; procesos fotoelectroquímicos activados con irradiancia solar; O₃, UVC/cloro y UV/H₂O₂; foto-Fenton solar y procesos similares a Fenton a pH neutro mediante el empleo de agentes complejantes del hierro, etc. Los resultados se evalúan mediante técnicas analíticas, toxicológicas y microbiológicas avanzadas como TOC, UPLC, cromatografía iónica, cromatografía de permeabilidad en gel, GC/MS, LC/MS, reflexión y espectroscopia IR, fluorescencia UV en estado estacionario, difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica (SEM y TEM), PCR real time con HRM y respirometría (ensayos de toxicidad y biodegradabilidad en fangos activados).

Entre los resultados obtenidos hasta el momento en este proyecto por el grupo TSA en PSA, cabe destacar la aplicación de un residuo industrial, como es el alpechín, procedente del procesado de la aceituna, como alternativa natural interesante e innovadora a los agentes quelantes sintéticos y comerciales de hierro que se emplean en los procesos solares de foto-Fenton a pH natural para evitar la precipitación de este reactivo. Debido a su alto contenido en polifenoles, este residuo, que se genera en países soleados productores de aceite de oliva como España, el sur de Italia, Portugal y Grecia, puede valorizarse como aditivo para descontaminación de aguas. Se ha demostrado, por tanto, la eficacia en la reutilización de alpechín altamente diluido (1: 1500) para la eliminación de micro-contaminantes contenidos en efluentes de Estaciones Municipales Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), como terbutrina, clorfenvinfos, diclofenaco y pentaclorofenol (Figura 4). Se logró una degradación del 80% de dichos micro-contaminantes, aunque la velocidad de reacción fue lenta en comparación con el proceso convencional de foto-Fenton, debido a la inestabilidad del complejo Fe-polifenoles a pH neutro. Sin embargo, se observó que a un pH de alrededor

de 4 (considerablemente superior al pH óptimo de foto-Fenton que es 2.8), se logró una mayor estabilidad del complejo polifenol:Fe, pudiéndose proponer este sistema para el tratamiento de efluentes con micro-contaminantes y su posible reutilización en el riego de cultivos.

Hay que tener en cuenta que dicha aplicación exigiría un ajuste mínimo del pH alrededor de 4 hasta un pH compatible con el riego, simplemente mezclando el agua tratada con agua natural [18].

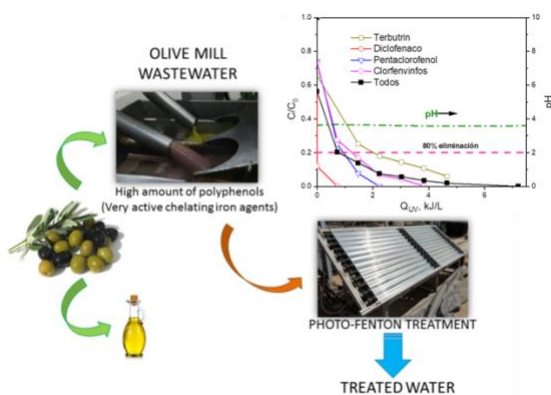


Figura 4. Resumen gráfico del artículo de Ruiz-Delgado et. al., que incluye los resultados relativos al trabajo de reutilización de residuos del alpechín como agentes complejantes del hierro durante el tratamiento de foto-Fenton solar para la eliminación de micro-contaminantes [18].

5. Proyecto NAVIA (Regeneración de agua residual urbana mediante nuevos materiales y tecnologías solares avanzadas)

El principal objetivo del proyecto NAVIA, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno Español, es el estudio y análisis de nuevas tecnologías basadas en Procesos Avanzados de Oxidación solares para el tratamiento de aguas residuales urbanas a escala planta piloto. Las actividades y paquetes de trabajo definidos en este proyecto se llevan a cabo en colaboración entre miembros de la Universidad de Almería (CIESOL), de la Universidad Politécnica de Valencia y de la Unidad de Tratamientos Solares del Agua de la PSA (CIEMAT).

Los procesos de oxidación solares propuestos en NAVIA son fotocatalisis heterogénea con fotocatalizadores novedosos basados en semiconductores o colorantes orgánicos soportados en esferas de sílice; y fotocatalisis homogénea mediante foto-Fenton solar con nuevas fuentes de hierro a pH neutro y procesos fotoquímicos con Cl₂ y H₂O₂, todos ellos empleando radiación solar como fuente de activación para la generación de especies reactivas del oxígeno, especialmente •OH. La evaluación de cada proceso avanzado de oxidación propuesto se llevará a cabo en tres niveles

tecnológicos: escala de laboratorio y escala planta piloto (fotorreactores) en modo discontinuo y finalmente en flujo continuo (Figura 5), permitiendo acercar los resultados a una potencial implementación futura. A lo largo de la evaluación de la eficiencia técnica de las tecnologías propuestas, se analizan diferentes indicadores de calidad del agua, incluyendo entre otros: i) *Escherichia coli* y coliformes totales (los cuales están comúnmente definidos en normativas de regulación del agua residual urbana), ii) Virus bacterianos, como colifagos somáticos y bacteriófagos RNA F-específicos, iii) Bacterias y genes resistentes a antibióticos (ARB&ARG, siglas en inglés) y iv) micro-contaminantes orgánicos, algunos de ellos incluidos en la nueva Regulación Europea de reutilización de agua.



Figura 5. a) Reactor CPC estático de 25L; b) Reactor CPC de flujo en discontinuo de 60L; c) Reactor tipo Raceway que operará en modo continuo de 90L. Todos estos fotorreactores están disponibles en las instalaciones de TSA en PSA (Tabernas, Almería, España).

Finalmente, y teniendo en cuenta que una adecuada selección de indicadores de calidad del agua, así como la elevada fiabilidad del sistema de monitoreo juegan un papel fundamental a la hora de asegurar la idoneidad del agua regenerada para riego de cultivos, el objetivo final de NAVIA es crear un sistema de monitoreo avanzado para el control de los tratamiento terciarios solares propuestos, considerando también medición de parámetros en línea. Con todo ello, se buscará el desarrollo de una herramienta de toma de

decisiones basada en un software capaz de recopilar, analizar y aprender de los datos de calidad del agua obtenidos en tiempo real para dar respuesta inmediata a determinados desajustes que se puedan producir en los tratamientos.

Conclusiones

La Unidad de Tratamiento Solar de Aguas de la PSA (CIEMAT, España) considera estratégico la definición de líneas de evolución que tengan como principal objetivo la integración de las energías renovables, los análisis de ciclo de vida y el tratamiento y reutilización de aguas residuales en un enfoque holístico de futuras "Ciudades Inteligentes" basadas en un concepto de economía circular. Para ello las actividades futuras de I+D deben basarse en el desarrollo de conceptos de hibridación de tecnologías innovadoras y/o convencionales incluyendo la eficiencia en el empleo de recursos, tales como la energía, el agua y los residuos. La recuperación de compuestos de elevado valor añadido contenidos en las aguas residuales al igual que su reúso en diferentes aplicaciones tales como el riego de cultivos, resultarán claves para garantizar la sostenibilidad de los nuevos sistemas que se propongan.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), AEI y FEDER por la financiación de los proyectos CALYPSOL (Referencia: RTI2018-097997-B-C32) y NAVIA (Referencia: PID2019-110441RB-C32).

Referencias

- [1]. B. Petrie, R. Barden, B. Kasprzyk-Hordern, "A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring," *Water Res.*, vol. 72, pp. 3-27, 2015.
- [2]. M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. U. Jr. Pittman, D. Mohan, "Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods," *Chem. Rev.*, vol. 119, pp. 3510–3673, 2019.
- [3]. L. Sandegren, "Low sub-minimal inhibitory concentrations of antibiotics generate new types of resistance," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 11 pp. 46–48, 2019.
- [4]. World Health Organization, "Summary of priority pathogen list reported by the WHO" (Publication date: 27 February 2017) (<http://www.who.int/medicines/publications/global-priority-list-antibiotic->

[resistant-bacteria/en/](#)

- [5]. P. Krzeminski, M.C. Tomei, P. Karaolia, A. Langenhoff, C.M.R. Almeida, E. Felis, D. Fatta-Kassinos, "Performance of secondary wastewater treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern implicated in crop uptake and antibiotic resistance spread: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 648, pp. 1052–1081, 2019.
- [6]. Y. Du, X.T. Lv, Q.-Y. Wu, D.-Y. Zhang, Y.-T. Zhou, L. Peng, H.-Y. Hu, "Formation and control of disinfection byproducts and toxicity during reclaimed water chlorination: A review," *J. Environ. Sci.*, vol. 58, pp. 51-63, 2017.
- [7]. X. Liu, L. Chen, M. Yang, C. Tan, W. Chu, "The occurrence, characteristics, transformation and control of aromatic disinfection by-products: A review," *Water Res.*, vol. 184, Art. no. 116076, 2020.
- [8]. S. Malato, P. Fernández-Ibáñez, M.I. Maldonado, J. Blanco, W. Gernjak, "Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends," *Catal. Today.*, vol. 147, pp. 1–59, 2009.
- [9]. D. Kanakaraju, B.D. Glass, M. Oelgemöller, "Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review reserved," *J. Environ. Manage.*, vol. 219, pp. 189-207, 2018.
- [10]. J.A. Ungwanen, A.W. Raymond, U.I. Adams, S. Rufus, F.D. Renato, "A review on the use of chelating agents as an alternative to promote photo-Fenton at neutral pH: Current trends, knowledge gap and future studies," *Sci. Total Environ.*, vol. 710, Art. no. 134872, 2020.
- [11]. I. Oller, S. Malato, "Photo-Fenton applied to the removal of pharmaceutical and other pollutants of emerging concern," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 29, Art. no. 100458, 2021.
- [12]. S. Miralles-Cuevas, I. Oller, A. Ruíz-Delgado, A. Cabrera-Reina, L. Cornejo-Ponce, S. Malato, "EDDS as complexing agent for enhancing solar advanced oxidation processes in natural water: Effect of iron species and different oxidants," *J. Hazard. Mater.*, vol. 372, pp. 129-136, 2019.
- [13]. I. De la Olla, L. Ponce-Robles, S. Miralles-Cuevas, I. Oller, S. Malato, J. A. Sánchez Pérez, "Microcontaminant removal in secondary effluents by solar photo-Fenton at circumneutral pH in raceway pond reactors," *Catal. Today.*, vol. 287, pp. 10-14, 2017.
- [14]. J.L. Mendoza, M.R. Granados, I. de Godos, F.G. Acién, E. Molina, C. Banks, S. Heaven, "Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production," *Biomass. Bioenergy*, vol. 54, pp. 267-275, 2013.
- [15]. M. I. Polo-López, J. A. Sánchez Pérez, "Perspectives of the solar photo-

Fenton process against the spreading of pathogens, antibiotic resistant bacteria and genes in the environment," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 27, Art. no. 100416, 2021.

- [16].S. Malato, J. Blanco, A. Vidal, C. Richter, "Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview," *Appl. Catal. B.*, vol. 37, pp. 1-15, 2002.
- [17].J. Blanco, S. Malato, C. Estrada, J. Peral, B. Sanchez, A. Cardona, "Diseño de reactores para fotocatalisis: Evaluación comparativa de las distintas opciones," En " *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*," CYTED, 243-266, 2001.
- [18].A. Ruíz-Delgado, M.A. Roccamante, I. Oller, A. Agüera, S. Malato, "Natural chelating agents from olive mill wastewater to enable photo-Fenton like reactions at natural pH," *Catal. Today.*, vol. 328, pp. 281-285, 2019.