Proyecto Icarus: recuperación y revalorización de recursos secundarios para su uso en la industria

Aina Soler Jofra; Mª Mar Micó Reche; Miriam Carolina Pérez Cova; Mireia Marcé Escalé, del Departamento de Innovación de Agua en Acciona

El sector del agua evoluciona constantemente hacia prácticas más sostenibles y eficientes, impulsando la digitalización, la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico. En este contexto, la circularidad en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) resulta clave para transformar y optimizar el tratamiento de aguas. Tradicionalmente, estas instalaciones se han centrado en la eliminación de contaminantes como etapa previa a la descarga del agua tratada en el medio ambiente, asegurando la calidad de los efluentes. Sin embargo, en el contexto actual en el que se intenta optimizar recursos y energía, las EDAR están evolucionado hacia la recuperación de materias presentes en sus procesos con el fin último de revalorizarlas, en línea con los principios de economía circular. Esta transformación debe ir acompañada de la reducción de la huella de carbono, la optimización de costes operativos y el cumplimiento de las nuevas normativas ambientales. Las EDAR evolucionan, por tanto, de un escenario en el que únicamente tratan el agua que les llega de la red de saneamiento hacia su transformación en biofactorías, generando productos y promoviendo la circularidad.

El sector de la construcción es responsable del 40% de la extracción de materias primas primas del mundo [1], lo que genera un impacto significativo en el medioambiente debido a la extracción y procesamiento de estos recursos. Además, es uno de los principales sectores de generación de residuos (responsable de hasta un 30-40% del total de residuos en la UE entre 2018 y 2022 [2]). Sin embargo, muchas de estas materias primas pueden ser reemplazadas por alternativas más sostenibles, como los materiales reciclados y revalorizados. La celulosa es un ejemplo de un recurso presente en las EDAR que puede valorizarse en el sector de la construcción, reduciendo la demanda de nuevas materias primas, la generación de residuos y la huella de carbono de la industria.

LA VALORIZACIÓN DE LA CELULOSA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

En el caso de la Unión Europea, el sector de la construcción es responsable del 50% de la extracción de materias primas [3]. Este sector generó aproximadamente 844 millones de toneladas de residuos en 2022 [4] (33 millones/año únicamente en España [5]), lo que representó alrededor del 38% del total de residuos de la región. El sector de la construcción consume además entorno al 40% de la energía global [6], principalmente en la producción de morteros y hormigones. Por ello, este sector resulta un candidato ideal para implementar estrategias de economía circular. Así, si en lugar de utilizar materias primas vírgenes se emplean materiales reciclados o provenientes de residuos, se conseguirá un aumento significativo en la sostenibilidad de los diferentes procesos.

En estudios previos [7,8], se ha demostrado que las fibras celulósicas podrían emplearse como componente de refuerzo en materiales aglutinantes. Más específicamente, estas fibras procedentes de la EDAR se añadirían, por ejemplo, a mezclas de hormigón que se aplicarían especialmente en losas y pavimentos. Estas estructuras de hormigón tienen una gran superficie expuesta en comparación con su volumen y son propensas a agrietarse debido a la contracción por secado, especialmente en climas ventosos y calurosos. Como consecuencia, estas grietas son la puerta de entrada de agentes agresivos como cloruros o sulfatos que acaban disminuyendo la vida útil de las estructuras de hormigón. El uso de las fibras de celulosa permitiría reducir la anchura de las grietas o incluso evitar que aparezcan. Esto es debido a que el polímero superabsorbente presente en la celulosa tiene importantes beneficios para prevenir las grietas debidas a la contracción durante el secado, ya que impide que el agua se evapore, manteniéndola en la pasta de cemento y reduciendo las tensiones mecánicas debidas al proceso de secado diferencial entre el núcleo y la superficie de las losas o pavimentos.

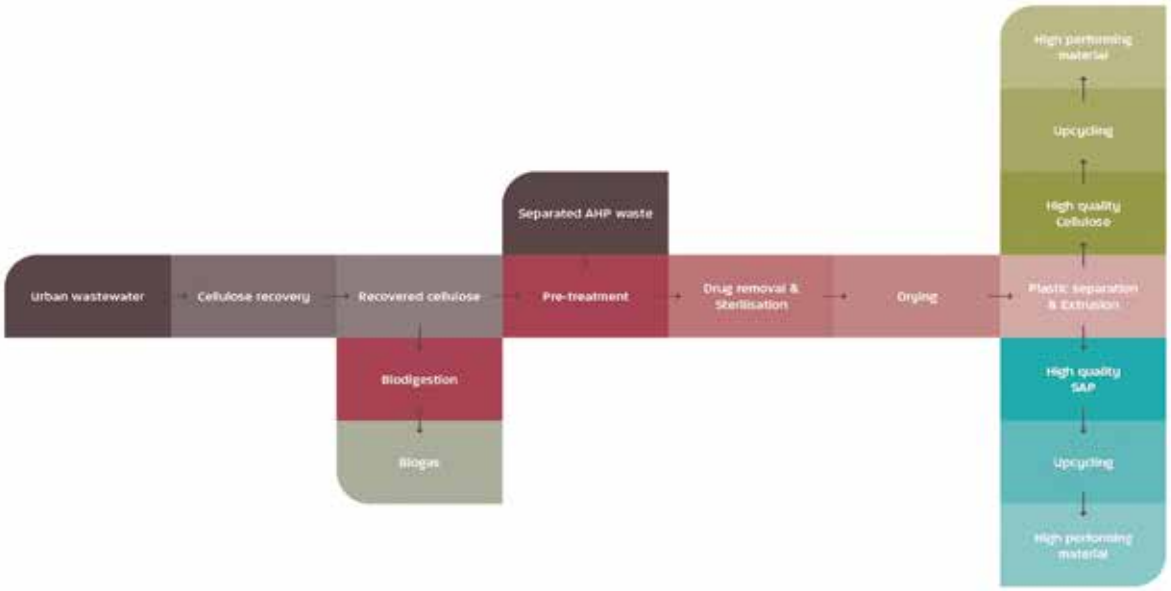
» El proyecto Icarus busca la recuperación de celulosa para su posterior uso en el sector de la construcción, convirtiendo las EDAR en fuente de recursos. Sin contaminantes emergentes, metales y otras impurezas, las fibras recuperadas se utilizarán en cementos y pavimentos de hormigón

LA INNOVACIÓN DE ICARUS EN LA RECUPERACIÓN DE CELULOSA

La elevada presencia de fibras de celulosa procedentes del papel higiénico presenta una gran oportunidad para su revalorización en las EDAR. Así, el papel higiénico es la fuente principal de celulosa en las EDAR, representando entre un 20 y un 30% de la DQO del efluente de entrada. En Europa, el consumo de papel higiénico per cápita varía entre 10 y 50 gramos por persona y día, con un contenido de aproximadamente el 85% en celulosa. Por tanto, se estima que únicamente en la Unión Europea ya se genera un residuo de celulosa de aproximadamente 4,3 millones de toneladas al año. Estas cifras muestran que la recuperación de celulosa no solo contribuirá al fomento de estrategias de economía circular, sino también podrá reducir la carga de entrada de la EDAR, y en consecuencia el gasto energético asociado a la depuración del agua.

En este contexto, surge el proyecto europeo Icarus (*Increasing circularity in process industries by upcycling secondary resources*, GA 101138646), que pretende valorizar residuos de diferentes industrias para obtener productos secundarios que puedan ser aplicados en el sector de la construcción, como aditivos aplicables a la fabricación de cemento, asfalto, pavimientos cerámicos o incluso acero. La participación del negocio de Agua de Acciona en este proyecto se centra en la recuperación de la celulosa presente en las EDAR y su revalorización en el sector de la construcción, mejorando los principios de economía circular en los procesos industriales. Las fi-

FIGURA 1. Esquema del caso 2 de demostración del proyecto Icarus, centrado en recuperación de celulosa y reutilización para materiales de construcción.



bras de celulosa recuperadas se utilizarán en cementos y pavimentos de hormigón con el fin de mejorar sus propiedades, evitando las grietas debidas a la contracción por secado. En consecuencia, se espera que puedan ser un sustituto de las microfibras de polipropileno que se utilizan actualmente para dicho uso.

En cuanto a tecnologías para la recuperación de celulosa, una de las más estudiadas son los filtros de banda rotativos (RBF por su nombre en inglés), que permiten recuperar hasta un 37% de la DQO del influente y hasta 26,6 g/m^3 de celulosa [9]. Sin embargo, una de las principales limitaciones a la hora de implementar esta tecnología en las EDAR es la falta de legislación concreta que promueva la necesidad de recuperación y valorización de este residuo en un recurso explotable para la industria, y que a su vez sea una materia prima secundaria que cuente con la aceptación social.

El proceso planteado por Icarus para la recuperación y valorización de la celulosa se resume en la **Figura 1**.

En el caso de Acciona, el proceso de recuperación de celulosa tendrá lugar mediante una planta piloto que se instalará en la EDAR de Sant Celoni, Barcelona (**Figura 2**). Además de la recuperación de celulosa de la EDAR, se obtendrá también celulosa de los productos de higiene absorbentes (AHP por su nombre en inglés), los cuales incluyen pañales, compresas, productos de higiene personal, toallitas etc. Estos AHP se obtendrán a partir de residuos sólidos municipales en el norte de Italia.

La principal propuesta de valor del proyecto Icarus es la recuperación de celulosa para su posterior uso en el sector de la construcción, convirtiendo las EDAR en fuente de recursos. Es importante, además, matizar el especial énfasis que realiza el proyecto en la calidad del producto final, garantizando que cumple con los estándares y calidades determinados por la normativa y asegurando la eliminación de contaminantes emergentes, metales y otras impurezas que pudieran comprometer la calidad del producto final. De igual modo, en el marco del pro-

FIGURA 2. EDAR de Sant Celoni (Barcelona) donde se llevará a cabo la recuperación de celulosa del proyecto Icarus.

yecto se establecerá el pasaporte digital del producto, o DPP de sus siglas en inglés *digital product passport*. El DPP es una herramienta que recopila y proporciona información detallada sobre un producto a lo largo de todo su ciclo de vida. Su objetivo es mejorar la trazabilidad, la sostenibilidad y la circularidad de los productos finales, aumentando la transparencia en la cadena de suministro. De esta manera, el proyecto Icarus permitirá la replicación y transferibilidad de la revalorización de los aditivos celulósicos en la industria de la construcción, también en otros sectores que puedan ser de interés.

Otro de los factores claves del proyecto Icarus es la sinergia y la circularidad que se promueve en los negocios de Acciona, favoreciendo que uno de los residuos recuperados en el negocio de Agua pueda ser utilizado en el negocio de la Construcción, creando sinergias que facilitan la implementación de este tipo de propuestas en el mercado y, a su vez, desarrollando un plan de negocio y mercado, estable e implementable.

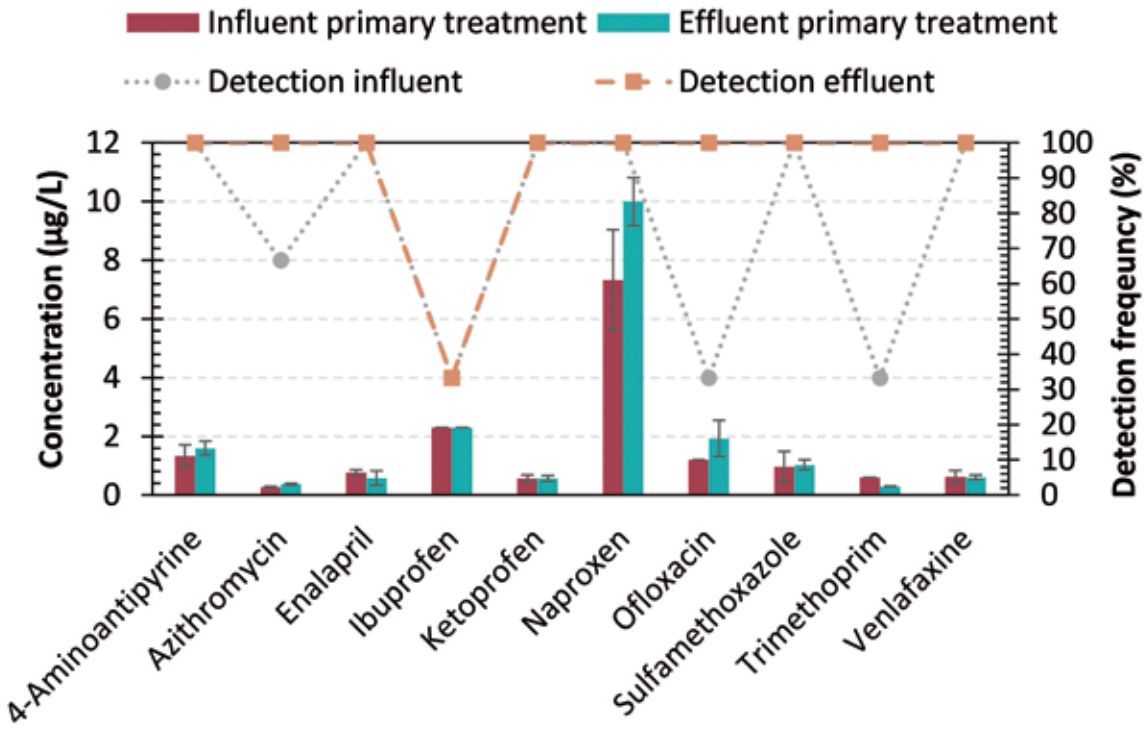
RESULTADOS: PRESENCIA Y EXTRACCIÓN DE CELULOSA EN LAS EDAR

Con el objetivo de recuperar la celulosa, en la primera fase del proyecto Icarus se ha llevado a cabo la caracterización del tratamiento primario de la EDAR de Sant Celoni, donde se instalará el piloto de recuperación de celulosa. Además de los parámetros habituales de monitorización de la EDAR, durante la caracterización se puso especial énfasis en la identificación y cuantificación de microcontaminantes que se puedan trasladar al producto final. En ese sentido, se analizó el contenido de metales y fármacos y microplásticos, para establecer la necesidad de su seguimiento en el producto final.

De los 8 metales analizados se detectaron aluminio, bario y zinc, en la entrada y salida del tratamiento primario de la EDAR de Sant Celoni. Estas concentraciones se encuentran dentro del rango establecido por la literatura para el agua residual urbana [10]. Sin embargo, en España no existe ninguna norma que establezca el contenido máximo de metales en la celulosa recuperada. Por lo tanto, será necesario caracterizar la supuesta acumulación de metales en el lodo recuperado con el RBF y su análisis se incluirá durante la demostración y revalorización del producto.

De los 38 fármacos analizados en la EDAR de Sant Celoni, 10 de ellos se detectaron por encima del límite de cuantificación (**Figura 3**): 4 antibióticos (azitromicina, ofloxacino, sulfametoxazol y trimetoprima), 3 antiinflamatorios no esteroideos (ibuprofeno, ketoprofeno y naproxeno), un analgésico (4-aminoantipirina),

FIGURA 3. Resultados del análisis de microcontaminantes en la caracterización inicial del efluente primario de la EDAR de Sant Celoni, tanto la frecuencia de detección de los diferentes contaminantes en el influente y en el efluente del tratamiento primario, como la concentración de dichos microcontaminantes.



» Icarus fomenta la circularidad en la industria a partir de la recuperación y revalorización de recursos secundarios. Más en concreto, se convierte en el nexo entre el papel higiénico que llega a las depuradoras y los bloques de cemento como producto final

un fármaco para la hipertensión arterial (enalapril) y un antidepresivo (venlafaxina). El naproxeno fue el compuesto detectado a concentraciones más altas de 5-10 µg/L, y el resto de fármacos se detectaron a concentraciones inferiores a 2 µg/L. A la vista de los resultados actuales, podría ser aconsejable medir, tanto en los lodos RBF recuperados como en la celulosa reciclada, algunos de los fármacos detectados en las aguas residuales, para asegurar que no quedan retenidos en las fibras celulósicas. Finalmente, entre los microplásticos analizados, el polietileno fue el principal compuesto susceptible de ser recuperado conjuntamente a los lodos obtenidos del RBF.

La cantidad de celulosa y hemicelulosa en el efluente del tratamiento primario de la EDAR de Sant Celoni osciló entre 3,51 y 38,02 g de celulosa/100 gTS y 3,51 a 8,63 g de hemicelulosa/100 gTS. La cantidad de celulosa en este punto de la EDAR, que será el punto de aplicación del filtro RBF, se encuentra dentro de los valores reportados en la literatura de 25-30% [11]. Además, el contenido de celulosa del efluente del tratamiento primario se encuentra en su mayoría en el rango del afluente del tratamiento primario, lo que indica que se elimina poca celulosa en el tratamiento primario.

Se espera que el contenido de celulosa analizado sea suficiente para poderla revalorizar, aunque la recuperación con el RBF deberá optimizarse teniendo en cuenta las fluctuaciones diarias. Además, tal y como se ha mencionado previamente, se monitorizarán los microcontaminantes detectados durante el proceso de recuperación y valorización para asegurar que estos no llegan al producto final, y que este cumpla con los límites impuestos por las normas europeas (UNE-EN) de seguridad y calidad de los productos de construcción.

CONCLUSIÓN: UNA MIRADA MÁS AMPLIA DEL PROYECTO ICARUS

Además de la recuperación y valorización de la celulosa como material de construcción, el proyecto Icarus va más allá y plantea obtener otros productos secundarios que puedan ser aplicados en el sector de la construcción. Así, otro caso de estudio dentro del proyecto, incluye la revalorización del residuo de aluminosilicato de litio obtenido durante la extracción del litio, pudiendo ser utilizado como materia prima secundaria en la industria de cerámica y reduciendo la importación de feldespato. Finalmente, el tercer caso de estudio del proyecto se centra en la valorización de residuos siderúrgicos para utilizarlos de nuevo en el sector de la construcción mediante procesos de captura y almacenamiento de carbono. El proyecto investiga, por ejemplo, fuentes alternativas de calcio y hierro y la valorización de las escorias de acero para su uso como sustituto, o bien de la arena en el hormigón o de pigmentos de cromo en baldosas cerámicas.

El proyecto Icarus está cofinanciado por la Unión Europea en el marco del Programa Horizon Europe y cuenta con la participación de 18 entidades de 7 países diferentes, uniendo a universidades, centros de investigación, centros tecnológicos, empresas privadas y consultoras especializadas en impacto social y transferencia de resultados con el objetivo de aumentar la disponibilidad de productos secundarios recuperados de corrientes residuales. El proyecto Icarus tiene una duración de 4 años y un presupuesto global de más de 9 millones de euros. El Consorci Besòs Tordera colabora en el proyecto Icarus, brindando a Acciona la oportunidad de situar la planta piloto en la EDAR de Sant Celoni.

Bibliografía

[1] https://www.residuosprofesional.com/construccion-consumo-materiales/.

[2] https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180328STO00751/el-trabajo-de-la-ue-para-la-gestion-sostenible-de-residuos.

[3] Mollaei *et al.* (2023). Journal of Cleaner Production, 429, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139525.

[4] https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180328STO00751/el-trabajo-de-la-ue-para-la-gestion-sostenible-de-residuos.

[5] https://www.retema.es/actualidad/desafios-y-oportunidades-para-la-circularidad-de-rcd-debate-en-el-ii-congreso.

[6] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.

[7] Kawashima *et al.* (2011). Cement and Concrete Composites, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018.

[8] Wang, L. *et al.* (2024). 3D Print Addit Manuf. 2024; 11(1):50-59. https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200113.

[9] Taboada-Santos, A. *et al.* Environmental Science: Water Research & Technology, 5(4), 704-712. https://doi.org/10.1039/C8EW00899J.

[10] Chen, G.H. *et al.* (2020). Biological wastewater treatment: principles, modeling and design. IWA publishing. https://doi.org/10.2166/9781789060362.

[11] Ahmed, A.S. *et al.* (2019). Water Environment Research, 91,1479-1489. https://doi.org/10.1002/wer.1145.