

Proyecto Life Zero Waste Water: Propuesta de saneamiento urbano integral para la recuperación de recursos del agua residual y la FORSU

Miguel Roldán, investigador en la Universitat de València; **Juan Bautista Giménez**, profesor ayudante doctor en la Universitat de València; **Anuska Mosquera**, profesora titular en la Universidad de Santiago de Compostela; **Lydia Sáez García**, responsable de Investigación del Canal de Isabel II; **José Ramón Vázquez**, jefe de área del Departamento de Innovación de Aqualia; **Aurora Seco**, doctora en Ciencias Químicas y catedrática en la Universitat de València; **Josep Ribes**, doctor ingeniero químico y profesor titular en la Universitat de València



El proyecto Life Zero Waste Water supone una oportunidad para avanzar hacia la implantación de las instalaciones de recuperación de recursos (IRR) como evolución de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) basándose en los principios de la economía circular. El modelo de IRR propuesto en este proyecto permitirá maximizar la recuperación de energía y los recursos existentes en las aguas residuales urbanas (ARU) y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) para responder a las nuevas demandas sociales en un contexto de cambio climático y escasez de recursos y energía. En concreto, se estudiará la obtención de biogás (fuente de energía renovable y potencial sustitutivo del gas natural), los nutrientes (nitrógeno y fósforo), la materia orgánica en forma de compost y el agua tratada mediante ultrafiltración, apta para riego u otros usos. En este contexto, la gestión integral de las ARU y la FORSU, mediante las tecnologías de reactor biológico anaerobio de membranas (AnMBR) y de nitrificación parcial-anammox (PN/AMX) son clave en la mejora de la sostenibilidad de los procesos convencionales, ya que además permiten disminuir significativamente los consumos energéticos e impacto ambiental asociado a la gestión de estas corrientes por separado. En la EDAR de Valdebebas se ha construido una IRR con capacidad para 300 habitantes equivalentes en la que se estudiarán y cuantificarán los beneficios que ofrecen estas tecnologías, así como las facilidades para cumplir con la legislación actual.



CAMBIO DE PARADIGMA: HACIA CERO EMISIONES Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS

El proyecto Life Zero Waste Water (ZWW, <https://lifezerowastewater.com/>) se inició en 2020 con la participación de Aqualia, la Universitat de València, la Universidad de Santiago de Compostela, el Canal de Isabel II, junto con las empresas Simbiente (Portugal) y VWMS (Austria) (**Figura 1**), con el objetivo de impulsar un cambio de paradigma en los sistemas de saneamiento urbano y depuración de aguas, mediante la transformación del antiguo concepto de estación depuradora de aguas residuales (EDAR) por el de instalaciones de recuperación de recursos (IRR), donde el objetivo no se centra únicamente en eliminar la carga contaminante de las aguas residuales urbanas (ARU), sino en extraer, producir y recuperar todos los recursos potencialmente aprovechables de estas ARU y, en caso de gestión conjunta, de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). Concretamente, en estas IRR se puede recuperar: energía (en forma de biogás o biometano), nutrientes, agua regenerada de alta calidad (con o sin nutrientes) y materia orgánica bioestabilizada (compost) para dar respuesta a las nuevas necesidades sociales de sostenibilidad y acordes a un modelo de gestión integrada de los recursos basado en la economía circular.

Parte de estas necesidades sociales de sostenibilidad fueron plasmadas en la Directiva Marco de Residuos (UE) 2018/851, que se ha traspuesto en la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular, donde se establece la obligatoriedad actual de la recogida separada de la FORSU de origen doméstico en municipios de más de 5.000 habitantes y, a partir del 31 de diciembre de 2023, en aquellos de menor población. Además, esta ley prohíbe tanto la incineración como el depósito en vertedero de cualquier residuo recogido separadamente. También establece un objetivo de preparación para reutilización y reciclado del 55% de los residuos en 2025, que aumenta hasta el 65% en 2035, y limita la presencia de impurezas en los biorresiduos al 20% en la actualidad y el 15% en 2027, estando sujetas las infracciones a sanciones administrativas.

» El proyecto Life Zero Waste Water supone una oportunidad para avanzar hacia la implantación de las instalaciones de recuperación de recursos como evolución de las actuales EDAR basándose en los principios de la economía circular, además de demostrar las ventajas de una gestión integral de los sistemas de saneamiento urbano basada en el uso de la tecnología anaerobia

FIGURA 1. Participantes del proyecto Life Zero Waste Water.



Anteriores experiencias siguiendo el método convencional para la recogida separada de la FORSU en contenedores marrones han presentado importantes limitaciones para alcanzar estos requisitos legales, como la baja participación ciudadana (de forma generalizada inferior al 40%, incluso después de más de 15 años de implantación de la recogida selectiva) y la presencia de cantidades de impurezas superiores a las marcadas (que alcanzan valores por encima del 15% de forma habitual, pudiendo llegar a valores del 25%). Además, estos valores suponen un riesgo para el reciclaje del compost/digestato producido o la necesidad de incluir sistemas mecánicos de mayor complejidad para la retirada de las impurezas. El sistema de recogida puerta por puerta, si bien mejora sustancialmente estos resultados, pudiendo incluso cumplir con los objetivos legales marcados, requieren de un gran esfuerzo por parte de la población y están asociados a una serie de impactos ambientales y sociales, como son, por ejemplo, la presencia de cubos de basura y contenedores en domicilios y calles (pudiendo provocar olores y la presencia de insectos y plagas), o el tráfico de camiones, que en núcleos de población diseminada o niveles bajos de participación puede ser altamente ineficiente. Por todo ello, desde el proyecto Life ZWW se propone un modelo de gestión integral (ARU + FORSU) con la recogida separada en origen de residuos de comida por medio de trituradores domésticos instalados bajo la pila de la cocina (FWD, *food waste disposers*), lo que permitiría alcanzar estos objetivos y

una gestión más sostenible en las poblaciones donde se hayan implementado IRR. Los FWD actuales confieren a la FORSU triturada unas características óptimas para su correcto transporte a través de la red de saneamiento hasta las IRR y garantizan una presencia mínima de impurezas en la corriente, puesto que el correcto uso de estos equipos impide la presencia de plásticos y otros materiales no orgánicos que suelen encontrarse en los actuales sistemas de recogida selectiva de la FORSU.

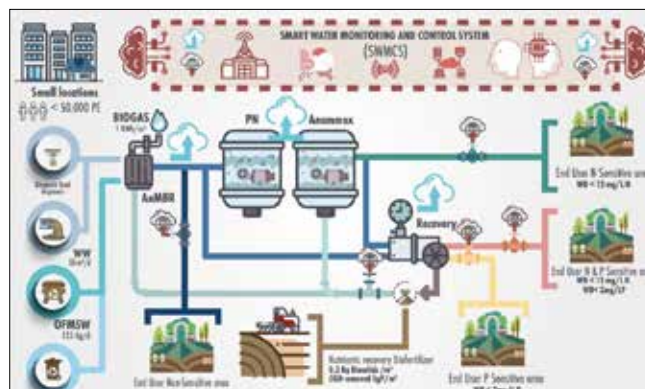
Una vez transportadas la FORSU y las ARU hasta las IRR, la tecnología de reactores biológicos de membranas anaerobios (AnMBR) juega un papel fundamental, ya que es capaz de retener la materia orgánica del agua residual y transformarla en energía, produciendo al mismo tiempo un permeado libre de agentes patógenos, pero rico en nutrientes (nitrógeno y fósforo), que cumple los requisitos actuales para su reutilización en fertirrigación.

El proyecto ZWW se enfoca hacia las instalaciones localizadas en áreas con una población inferior a 50.000 habitantes equivalentes puesto que en las instalaciones actuales de este tamaño, el tratamiento del agua y la estabilización del fango se produce principalmente mediante tecnologías aerobias, donde no solo se pierde el potencial energético de la materia orgánica tratada, sino que su operación requiere de elevados consumos energéticos para acabar transformando la materia orgánica en CO_2 , con una gran producción de fangos de EDAR como residuo de difícil gestión. Otro objetivo del proyecto será estudiar el diseño actual de las EDAR de este tamaño y las modificaciones necesarias para convertirlas en IRR.

LA IRR EN EL PROYECTO LIFE ZERO WASTE WATER

Como parte del proyecto se ha construido en la EDAR de Valdebebas una IRR de escala demostrativa, con capacidad para dar servicio hasta a 300 habitantes equivalentes. En esta instalación se tratará el ARU que llega a la EDAR de Valdebebas, junto con la cantidad de FORSU correspondiente a los 300 habitantes (unos 125 kg al día). Para garantizar la disponibilidad de FORSU a lo largo del estudio se han establecido acuerdos con grandes productores de residuos de comida cercanos a la EDAR, como la empresa Gate Gourmet (empresa de catering del Aeropuerto de Madrid-Barajas). También se alimentará a la planta FORSU de los sistemas de recogida selectiva de la localidad, si es posible, que serán posteriormente triturados, mezclados y tratados en la planta demostrativa. Además, el proyecto contempla la instalación de FWD en 30 domicilios y 4 establecimientos 'horeca' para estudiar los detalles de su implantación y uso generalizado.

FIGURA 2. Esquema de funcionamiento de la IRR operada en el proyecto Life Zero Waste Water.



Del tratamiento de ambas corrientes en el reactor AnMBR se estudiará la producción de biogás, fangos compostables, aptos para su uso con fines agrícolas o para la regeneración de suelos, y un efluente rico en nutrientes, apto para fertirrigación. Además, para aquellos casos en los que no sea posible el uso directo del agua para fertirrigación y se trate de un vertido a zona sensible, el proyecto cuenta con un sistema de postratamiento, basado en la tecnología PN/AMX con el que se podrá eliminar el nitrógeno del efluente con un coste energético reducido y una posterior recuperación del fósforo mediante sistemas de adsorción. La **Figura 2** muestra un diagrama de flujo con todas las posibilidades de recuperación de recursos del ARU+FORSU contempladas en el proyecto Life ZWW.

El primer paso en el tren de tratamiento de esta IRR se compone de un reactor biológico basado en la tecnología anaerobia de membranas (AnMBR) que incluye (ver **Figura 3a**):

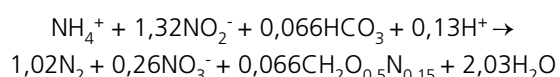
- Un reactor anaerobio que incluye el gasómetro integrado en el mismo, para producir y almacenar el biogás que se obtiene del tratamiento de la materia orgánica.
- Membranas de ultrafiltración, para poder trabajar a elevadas concentraciones de sólidos y altos tiempos de retención en un volumen de reacción reducido, favoreciendo el proceso anaerobio a temperatura ambiente, y garantizar la ausencia en el permeado, tanto de sólidos suspendidos como de microorganismos y patógenos.
- Membranas de desgasificación para recuperar el metano disuelto en el seno del permeado para que pueda ser aprovechado energéticamente y así evitar su posterior emisión a la atmósfera.



FIGURA 3. Imágenes de la planta demostrativa. Reactor AnMBR (izquierda) y sistema PN/AMX (derecha).



El segundo paso en el tren de tratamiento incluye un sistema de nitrificación-parcial y anammox (PN/AMX, ver **Figura 3b**), útil para eliminar con un bajo coste energético el nitrógeno del permeado obtenido en la planta AnMBR. Este proceso tiene lugar en dos etapas y consta de un primer reactor en el que se produce la nitrificación del 50% del NH_4 del afluente del reactor hasta NO_2 . En el segundo reactor se produce la eliminación autótrofa por parte de las bacterias anammox del NH_4 restante y el NO_2 obtenido en la etapa previa, dando lugar a N_2 , que es liberado a la atmósfera, según la reacción mostrada en la siguiente ecuación:



Además, para conseguir separar por adsorción el fósforo del efluente, se estudiarán distintos materiales que permitan su recuperación de la manera más sencilla posible y permitan su posterior reutilización agrícola.

Con respecto a la reutilización de las aguas para fertirrigación, se monitorizará la calidad del agua tratada mediante cuantificaciones *on line*, cada 15 minutos, para garantizar que los niveles de posibles patógenos son despreciables. Para ello, se utilizará el sistema ColiMinder de monitorización del efluente proporcionado por la empresa austríaca VWMS. Todos estos sistemas de tratamiento y monitorización se integrarán en un sistema de supervisión y control inteligente (SWMCS, *smart water monitoring and control system*) que se encargará de garantizar la calidad del agua obtenida en función de su destino final (fertirrigación directa, reutilización sin nutrientes o vertido a cauce), derivando el caudal

de permeado del AnMBR a los diferentes sistemas de postratamiento incluidos en la IRR.

Con los resultados obtenidos de la operación de la planta demostrativa, se analizarán y cuantificarán los beneficios esperables de la implantación del sistema propuesto a nivel industrial y se realizará un análisis de ciclo de vida ambiental (LCA) y social (SLCA) para comparar este sistema con los sistemas de tratamiento y gestión de ARU y FORSU convencionales.

BENEFICIOS DEL PROYECTO

Las ventajas reales del tratamiento conjunto de ARU y FORSU en la IRR de la EDAR de Valdebebas se cuantificarán durante la operación del proceso en condiciones estables, si bien algunas de ellas ya han sido estimadas gracias a estudios previos de las diferentes tecnologías por separado. Entre estas ventajas se encuentran:

- Una reducción en la huella de carbono fruto de la gestión conjunta de las corrientes de FORSU y ARU a través de la red de saneamiento.
- Un balance energético positivo con una producción neta de $1,0 \text{ kWh/m}^3$ fruto de la operación de las IRR, frente a los consumos de $0,5 \text{ kWh/m}^3$ para sistemas de fangos activados convencionales o de hasta $0,7 \text{ kWh/m}^3$ en sistemas de aireación prolongada.
- La posibilidad de reutilización de hasta el 95% de las aguas tratadas, libres de patógenos.

TABLA 1

COMPARACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE LAS PLANTAS BASADAS EN TRATAMIENTOS DE FANGOS ACTIVADOS Y LA IRR DEL PROYECTO LIFE ZWW.

Indicador	Fangos activados	IRR Life ZWW
Consumo energético (kWh/m ³)	0,5	-1,0
Emisiones por consumo energético (kgCO ₂ eq/m ³)	0,15	-0,30
Producción de biosólidos (kg/kg DQO eliminado)	0,4 (no estabilizados)	0,2 (estabilizados)
Reutilizabilidad del agua (%)	0 (sin considerar tratamientos terciarios)	95% (no requiere de tratamiento terciario)
Emisiones de N ₂ O (gN ₂ O/kgN eliminado)	36,0	7,2
Área requerida	++	+

- Una reducción en la producción de fangos de hasta el 50% en comparación con los procesos de fangos activados.
- La reducción hasta en un 150% de las emisiones de CO₂ asociadas a la operación de las IRR en comparación con las EDAR basadas en procesos de fangos activados.
- La reducción de las áreas ocupadas por las IRR frente a las EDAR gracias a la tecnología de membranas, que permite el tratamiento de caudales elevados en volúmenes reducidos.

Por lo que respecta al postratamiento del permeado obtenido, el proceso de eliminación de nitrógeno por medio del sistema PN/AMX ofrece ventajas adicionales en su operación con respecto al proceso convencional de nitrificación-desnitrificación:

- La reducción en el consumo energético de hasta el 60% de la energía necesaria para oxidar el NH₄.
- Una producción de fangos del orden del 10% en comparación con el proceso convencional.
- Unas emisiones de N₂O hasta un 80% menores. Cabe destacar que el N₂O tiene un potencial de ca-


lentamiento global de hasta 300 veces mayor que el CO₂.

En la **Tabla 1** se recoge una comparativa entre estos datos de operación esperados frente a los esperables en procesos de fangos activados convencionales.

CONCLUSIÓN

En definitiva, el proyecto Life ZWW supone una oportunidad para avanzar hacia la implantación de las IRR como evolución de las actuales EDAR, basándose en los principios de la economía circular. Además, los beneficios esperados de la operación de esta planta IRR demostrativa permitirán demostrar las ventajas de una gestión integral de los sistemas de saneamiento urbano basada en el uso de la tecnología anaerobia, como única tecnología capaz de reciclar los materiales existentes en estas corrientes de biorresiduos de origen doméstico, dando lugar a energía y otros recursos útiles para la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto Life Zero Waste Water ha recibido financiación del programa Life de la Unión Europea en virtud del acuerdo de colaboración LIFE19ENV/ES/000631. 

» Life Zero Waste Water es un proyecto demostrativo que pone en práctica, prueba y evalúa la aplicabilidad de una solución de EDAR innovadora, rentable y con balance energético positivo para la gestión integrada de flujos de residuos mixtos en el contexto específico de poblaciones pequeñas, basado en la combinación de tecnologías y metodologías validadas independientemente a diferentes escalas, pero nunca combinadas y aplicadas en el contexto específico del proyecto