

# ESTUDIO SOBRE EL PAPEL DE LA DIGITALIZACION Y EL MACHINE LEARNING EN LA GESTIÓN DE LAS INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNITAT VALENCIANA

---

Vicent Hernández Chover  
Lledó Castellet Viciano  
Agueda Bellver Domingo  
Francesc Hernández Sancho

---



Càtedra de  
Transformació del  
Model Econòmic  
Economia Circular  
en el Sector de l'Aigua



## Contenido

1. Introducción .....	3
2. La transformación de los datos en información.....	6
a. Análisis de datos.....	8
b. Metodologías de análisis de datos.....	9
3. Machine learning en el sector de la depuración de aguas residuales .....	10
4. Oportunidades de la digitalización en el sector del tratamiento de aguas residuales .....	12
4.1. Digitalización orientada a la gestión del proceso.....	13
4.1.1. Monitorización de los efluentes.....	13
4.1.2. Gestión de activos .....	13
4.1.3. Información geoespacial .....	14
4.1.4. Optimización de la energía y emisiones asociadas .....	14
4.1.5. Gestión de fangos generados.....	15
4.2. Digitalización orientada a los canales de comercialización .....	15
4.2.1. Distribución de agua.....	16
4.2.2. Distribución de nitrógeno y fósforo .....	17
4.2.3. Distribución de fangos.....	18
4.2.4. Distribución de energía .....	20
5. La digitalización aplicada a los canales de distribución y comercialización .....	21
6. Bibliografía .....	26

## 1. Introducción

En los últimos años, los avances tecnológicos han creado una serie de oportunidades en los ámbitos económico, social y medioambiental. Estos progresos tecnológicos han otorgado a varios sectores económicos una mayor capacidad de adaptación y personalización en la oferta de productos y servicios, al mismo tiempo que les han permitido un mayor control sobre los procesos de producción y distribución. Sin embargo, estos cambios tecnológicos también presentan desafíos, como la necesidad de invertir en adaptaciones, abordar cuestiones legales relacionadas con la seguridad y la privacidad, y garantizar la disponibilidad de datos e información (Paulus-Rohmer et al., 2016; Bouwman et al., 2017).

Cuando hablamos de cambios tecnológicos, es imprescindible mencionar el concepto de digitalización. La digitalización se refiere al proceso de convertir datos analógicos en formato digital, y la aplicación de tecnologías para llevar a cabo esta transformación implica explorar plataformas y modelos de negocio que utilizan dispositivos, técnicas y tecnologías digitales. Este enfoque abarca desde la supervisión de sistemas de producción y la simplificación de procesos empresariales hasta la mejora de la seguridad en las transacciones, infraestructuras y economía, entre otros aspectos. La digitalización, en consecuencia, permite la implementación de diversas tecnologías para mejorar los servicios actuales, aumentar la eficiencia de los procesos o crear nuevos productos y servicios. Esto, a su vez, contribuye a la sostenibilidad del modelo económico (Matzler et al., 2016).

En el actual contexto económico, la digitalización desempeña un papel central en la transformación del modelo económico. La conectividad habilitada por la digitalización genera grandes volúmenes de datos que posibilitan un análisis detallado de los impactos sociales, ambientales y económicos relacionados con el consumo de productos y servicios. Por lo tanto, la digitalización se convierte en una herramienta fundamental para alcanzar los ambiciosos objetivos de sostenibilidad en diversos sectores industriales. Esta transformación digital acelera y promueve la transición hacia una economía más consciente y alineada con la preservación del planeta y el bienestar de la población. En consecuencia, la digitalización puede contribuir a desvincular la actividad económica del uso de los recursos naturales y sus impactos ambientales (Barteková, E. and P. Börkey

(2022). Unos recursos naturales limitados que pueden poner en serio riesgo la economía mundial. Desde la década de 1970, la extracción mundial de estos recursos se ha triplicado, y se espera que se duplique hasta alcanzar los 190.000 millones de toneladas en 2060 (ONU, 2019). La creciente demanda de minerales críticos para las tecnologías del futuro aumenta la preocupación por la seguridad en el suministro, especialmente debido a la transición energética de los combustibles fósiles a fuentes renovables. Esto significa que la disponibilidad de recursos naturales se ve amenazada en el modelo económico actual.

Los niveles de explotación de recursos naturales generados por el sistema actual de producción y consumo han llevado a la Comisión Europea a desarrollar una serie de directrices con el propósito de aliviar la presión sobre estos recursos (Mazur-Wierzbicka et al., 2021). Estas directrices, impulsadas por la Unión Europea, se enfocan en la transformación del sistema económico actual, pasando de un modelo lineal a uno circular, donde los recursos y materiales se conservan en el sistema de producción durante períodos más prolongados. No obstante, para que esta transformación tenga un impacto real, es necesario implementar medidas específicas destinadas a optimizar el uso de los recursos naturales, al mismo tiempo que se generan nuevas oportunidades para gestionar los residuos producidos tanto por la industria como por la sociedad. En este contexto, la implementación de recursos tecnológicos basados en la digitalización y el posterior aprovechamiento de los datos generados permitirá supervisar estos avances, facilitando el progreso de la sociedad en el marco de una economía circular (EC) (Castellet-Viciano et al. 2022). El papel de la digitalización y su potencialidad en el marco de la EC cobra especial relevancia en el contexto del sector del agua.

Ilustración 1 Ciclo Urbano del Agua



El agua es un recurso natural limitado y extremadamente valioso en términos de su importancia para la productividad. La escasez de agua puede poner en riesgo el desarrollo económico de las empresas. A pesar de esto, el desarrollo económico actual ha ocurrido a expensas de la sobreexplotación y la contaminación de las fuentes de agua. La situación hídrica, tanto en términos de cantidad como de calidad de agua dulce disponible, empeora año tras año debido a los periodos de sequía cada vez más frecuentes y prolongados, atribuidos al cambio climático. Por lo tanto, es necesario revertir la situación actual con el objetivo de disponer de agua dulce en cantidad y calidad suficiente para mantener y generar el desarrollo económico en la sociedad (Brown and Lall 2006).

El ciclo urbano del agua y la protección del agua están estrechamente relacionados en la gestión sostenible de los recursos hídricos en entornos urbanos, y ambos son fundamentales para garantizar el acceso a agua limpia y segura para las comunidades. El ciclo urbano del agua lo forman todas las infraestructuras necesarias para el proceso de tratamiento del agua, distribución, recogida mediante sistemas de alcantarillado y posterior tratamiento de depuración antes de su vertido al medio. En este último punto, los tratamientos actuales permiten obtener un agua de calidad suficiente para ser reutilizada. Por lo que las estaciones depuradoras de aguas residuales pueden ser vistas como fuentes de agua no convencional. Además, estas infraestructuras son capaces de recuperar recursos del agua residual como, por ejemplo; los nutrientes (nitrógeno y fósforo) para la posterior producción de fertilizantes, generar biogás y energía a partir de los residuos orgánicos, producir bioplásticos, materiales de construcción (vidrio), e incluso recuperar adsorbentes, enzimas y proteínas del agua residual (Gherghel et al. 2019)

En este contexto, las tecnologías digitales ofrecen un gran potencial. Un proceso adecuado de digitalización de los flujos de información permite un control más exhaustivo de los procesos a todos los niveles, desde predecir la demanda de agua hasta supervisar los diversos contaminantes presentes en el agua residual para planificar los tratamientos necesarios y garantizar su reutilización en los canales apropiados. La digitalización facilita el análisis de datos en varios sistemas informáticos, lo que permite el análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos, proporcionando una amplia gama de indicadores que contribuyen a optimizar la gestión de estas infraestructuras. Además, se pueden evaluar la eficiencia de los tratamientos, incluyendo el consumo de energía y reactivos, y al agregar otras variables relacionadas con los activos de estas infraestructuras, se puede crear un gemelo digital del proceso completo. Los gemelos digitales son usados para simular múltiples escenarios como; variaciones de caudales, precipitaciones y cargas orgánicas, entre otros aspectos. Esta simulación permite al operador planificar diferentes alternativas en un entorno real, ayudando a reducir costes y mejorar la eficiencia energética minimizando el riesgo de derrames (Liu et al. 2023). Otro aspecto en el que la digitalización ofrece numerosas ventajas es la gestión centralizada de los activos físicos de las instalaciones. Su monitorización constante y la aplicación de algoritmos permiten reducir el riesgo de averías y los costes asociados al ciclo de vida en base a datos históricos, así como una mejor planificación de las tareas de mantenimiento más efectivas y el establecimiento de un plan de renovación e inversión en nuevos equipos e infraestructura (Hernández-Chover et al. 2022a).

En resumen, la aplicación de tecnologías para la monitorización y posterior evaluación de esta información es un paso crucial hacia un modelo más sostenible, proporcionando un valioso apoyo a las empresas en su esfuerzo por implementar la economía circular en sus procesos productivos.

## 2. La transformación de los datos en información

En la actual era de la información, los datos han emergido como un recurso de inmenso valor debido a su capacidad intrínseca para transformarse en información significativa. Esta transformación es fundamental para una amplia variedad de aplicaciones en diversas

áreas, desde los negocios hasta la investigación científica. En este contexto, es importante comprender el valor que los datos aportan al proceso de obtención de información.

En primer lugar, los datos actúan como una fuente de evidencia empírica sólida. Representan observaciones objetivas de eventos y hechos, lo que les otorga una cualidad incontestable. Esta característica es esencial en un mundo donde la toma de decisiones se basa en hechos verificables. Los datos proporcionan una base sólida sobre la cual se pueden fundamentar argumentos y juicios.

Asimismo, los datos contienen patrones y tendencias que pueden no ser inmediatamente visibles. A través del análisis de datos, es factible descubrir relaciones y correlaciones que pueden revelar oportunidades previamente ocultas o desafíos que requieren atención. Esta habilidad para identificar patrones subyacentes es de gran valor para la toma de decisiones estratégicas y la solución de problemas complejos.

La optimización de recursos es otra ventaja crucial que resulta de la transformación de datos en información. Mediante el análisis de datos, las organizaciones pueden tomar decisiones más fundamentadas acerca de la asignación de recursos, ya sea en términos de gestión de inventario, planificación de producción o asignación de personal. Esto no solo conlleva ahorros en tiempo y dinero, sino que también mejora la eficiencia operativa.

La toma de decisiones se beneficia enormemente de la información generada a partir de los datos. Los líderes y tomadores de decisiones pueden utilizar datos históricos y actuales para evaluar el impacto potencial de diferentes opciones y seleccionar la mejor estrategia. Esto conduce a decisiones más informadas y, en última instancia, a resultados más exitosos.

En campos como el marketing y el servicio al cliente, los datos permiten la personalización. Al analizar datos sobre el comportamiento y las preferencias del cliente, las empresas pueden ofrecer productos y servicios altamente relevantes y satisfactorios, mejorando así la experiencia del cliente y fortaleciendo las relaciones comerciales.

En resumen, los datos son el punto de partida esencial para la generación de información valiosa en una amplia gama de aplicaciones. Su capacidad de transformarse en información ya sea para respaldar decisiones, identificar patrones, optimizar operaciones o personalizar experiencias, es fundamental en un mundo impulsado por la información

y la tecnología. El valor de los datos radica en su potencial para convertirse en un recurso estratégico que impulsa el éxito en diversos ámbitos.

#### a. Análisis de datos

El análisis de datos es un proceso crucial en el campo de la ciencia de datos y la toma de decisiones. Implica examinar, limpiar, transformar y modelar datos con el objetivo de descubrir patrones, tendencias y obtener información valiosa.

Algunas de las fases a tener en cuenta en el análisis de datos son:

- **Recopilación de datos:** El proceso comienza con la recopilación de datos relevantes, que pueden provenir de diversas fuentes, como encuestas, sensores, bases de datos, registros históricos, redes sociales y más.
- **Limpieza de datos:** Es fundamental eliminar datos erróneos, incompletos o inconsistentes para garantizar la calidad de los datos. Esto puede incluir la imputación de valores faltantes y la corrección de errores.
- **Exploración de datos:** Se realiza un análisis exploratorio de datos (EDA, por sus siglas en inglés) para comprender mejor la naturaleza de los datos. Esto implica la visualización de datos, cálculo de estadísticas descriptivas y búsqueda de relaciones.
- **Selección de variables:** En muchos casos, es necesario seleccionar las variables más relevantes para el análisis, lo que puede ayudar a reducir la complejidad y mejorar la eficiencia del modelo.
- **Modelado de datos:** Se aplican diversas técnicas estadísticas y de aprendizaje automático para crear modelos que capturen los patrones presentes en los datos. Esto puede incluir regresión, clasificación, agrupación y más.
- **Evaluación de modelos:** Los modelos creados se evalúan utilizando métricas apropiadas para determinar su rendimiento y su capacidad para generalizar a nuevos datos.

- Interpretación de resultados: Los resultados del análisis se interpretan en términos de las preguntas o los objetivos de investigación. Esto implica la comunicación de hallazgos de manera clara y comprensible.

#### b. Metodologías de análisis de datos

Las metodologías de análisis de datos son enfoques sistemáticos y estructurados que guían el proceso de análisis de datos desde la recopilación inicial hasta la obtención de conclusiones y resultados significativos. Estas metodologías proporcionan un marco de trabajo para asegurar que el análisis se realice de manera consistente, rigurosa y eficiente.

Existen varias metodologías y enfoques:

- Análisis Estadístico:

Utiliza herramientas y técnicas estadísticas para analizar datos, como pruebas de hipótesis, análisis de varianza, regresión y estadísticas descriptivas.

- Aprendizaje Automático (Machine Learning):

Utiliza algoritmos de aprendizaje automático para predecir o clasificar datos basados en patrones identificados en un conjunto de entrenamiento.

- Minería de Datos:

Aplica técnicas de minería de datos para descubrir patrones ocultos o relaciones en grandes conjuntos de datos, como la agrupación, la asociación y la detección de anomalías.

- Análisis Exploratorio de Datos (EDA):

Un enfoque inicial para comprender los datos mediante la visualización, la estadística descriptiva y la identificación de tendencias y relaciones.

- Análisis de Series Temporales:

Se enfoca en datos que cambian con el tiempo, como las ventas mensuales o los datos climáticos, para identificar tendencias, estacionalidad y ciclos.

- Análisis de Texto y Minería de Texto:

Se utiliza para analizar documentos de texto y extraer información relevante, como temas, sentimientos y relaciones.

- Análisis Geoespacial:

Combina datos geográficos y espaciales para analizar patrones y tendencias en mapas, como la distribución de tiendas minoristas o la planificación urbana.

- Análisis Causal:

Busca establecer relaciones causales entre variables, identificando cómo un cambio en una variable afecta a otra.

- Análisis de Encuestas:

Se aplica a datos recopilados mediante encuestas y cuestionarios, incluyendo análisis de datos demográficos y de opinión.

La elección de la metodología depende de los objetivos del análisis y la naturaleza de los datos. A menudo, se combinan varias metodologías en un enfoque integrado para abordar preguntas complejas o problemas de análisis de datos. Cada metodología tiene sus propias herramientas y técnicas específicas, y su aplicación adecuada depende del contexto y de los datos disponibles. En este sentido, una de las metodologías que mayores aplicaciones tiene en el sector industrial es el machine learning, a continuación, se explican algunas de sus peculiaridades.

### 3. Machine learning en el sector de la depuración de aguas residuales

El objetivo del aprendizaje automático es proporcionar alguna conclusión o predicción a partir del conjunto de datos disponible utilizando un modelo. Las técnicas de aprendizaje automático (ML) permiten usar estos datos con el fin de ayudar a identificar y clasificar aspectos que pueden resultar de interés. El objetivo es analizar la existencia de posibles patrones que pueden estar relacionados con un objetivo establecido (Chen et al., 2020). Principalmente se pueden clasificar en aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje reforzado.

El aprendizaje supervisado tiene un enfoque reactivo debido a que el evento o consecuencia que se desea analizar es conocido de antemano (Gupta et al., 2018;

Adesanwo et al., 2017). Por lo tanto, el principal objetivo es construir un modelo de aprendizaje a partir de datos de entrenamiento previamente etiquetados. Las observaciones etiquetadas permiten hacer predicciones futuras junto con el margen de error o tolerancia que el modelo genera. Un mayor número de observaciones permitirá mejorar los resultados del modelo, disminuyendo el margen de error asociado (Rojas, E. 2018). En este caso, el aprendizaje supervisado puede devolver variables discretas (mediante tarea de clasificación) o valores continuos (regresión).

En el primer de los casos, variables discretas, se usa para predecir las etiquetas de clase categórica de nuevas instancias basadas en observaciones pasadas, por ejemplo, si deseamos conocer si un elemento del sistema productivo fallará o no, daremos el valor 1 a Fallo y el valor 0 al no Fallo. Estas etiquetas vienen definidas por una serie de variables explicativas asociadas al activo que estamos evaluando, éstas pueden ser las horas de operación, la edad, el tipo de agua residual, la existencia de cavitaciones etc.... de modo que, a partir de los datos de entrenamiento, el sistema ofrecerá una respuesta de 0 o 1 a partir de la similitud de los nuevos activos evaluados con observaciones pasadas. Esta tarea de clasificación permite usar más etiquetas de clase, por lo que no tiene que ser necesariamente una clasificación binaria. Un ejemplo del uso de más etiquetas podría ser el relacionado con los consumos de agua, pudiendo clasificar el consumo mensual en intervalos que oscilen entre 1 y 10 y que éstos dependan de características relacionadas con las viviendas, superficie, zona residencial, número de baños, número promedio de personas en la vivienda, etc.

Por otro lado, el aprendizaje supervisado puede predecir resultados continuos, es lo que conocemos con análisis de regresión. En este caso el objetivo es encontrar una relación entre las variables explicativas que permita predecir un resultado continuo. Para seleccionar la mejor combinación de variables capaces de explicar el modelo se usan técnicas estadísticas. Algunos trabajos que aplican regresiones al sector urbano del agua, por ejemplo, Hernandez-Chover, V. et al., (2019) modelizan el coste del mantenimiento a través del tiempo. Para lograrlo emplean una serie de variables explicativas relacionadas con la edad de la planta, la carga contaminante y los habitantes equivalentes tratados. Por otro lado, Castellet-Viciano, Ll. et al., (2018) obtienen un modelo que explica los consumos energéticos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

El aprendizaje no supervisado no cuenta con datos que definan un objetivo concreto, por lo que clasifican principalmente los datos a partir de patrones que permitan separar conjuntos similares. Esta técnica explora la estructura de los datos para extraer información significativa o similitudes entre los datos analizados que nos ayuden a comprender el patrón analizado. Para ello, el análisis recurre a la generación de grupos (clústeres), cada grupo viene definido por un grupo de observaciones que comparten cierto grado de semejanza (Bishop, C., 2007).

Por último, el aprendizaje reforzado consiste en desarrollar un sistema que mejore su rendimiento, para ello se usa una señal de recompensa. De modo que, a través de la interacción con el entorno, un agente puede utilizar el aprendizaje reforzado para aprender una serie de acciones que maximicen esta recompensa (López, J., López, B., & Díaz, V., 2004).

#### 4. Oportunidades de la digitalización en el sector del tratamiento de aguas residuales

El uso de herramientas digitales ha permitido un cambio fundamental en los procesos, tanto en la producción como en la distribución y consumo. Supone un cambio sustancial en el funcionamiento económico de la sociedad, ofreciendo múltiples posibilidades de virtualización, desmaterialización y mayor transparencia el uso de productos y flujos materiales, al mismo tiempo que se crean nuevas formas de operar y participar en la economía para productores y usuarios (Sukhdev et al., 2017). En el caso del sector del tratamiento de aguas residuales y la economía circular, la digitalización y el uso de metodologías para el análisis de datos permite innovar principalmente en dos aspectos; En primer lugar, en lo que concierne a la gestión empresarial (Leung et al. 2019) resume todas las áreas específicas de los procesos y tratamientos que se llevan a cabo en estas infraestructuras, incluye tanto el producto como los activos necesarios para el correcto funcionamiento del proceso. En segundo lugar, la digitalización permite desarrollar y mejorar los canales de comercialización para los recursos que las EDARs son capaces de generar, optimizando de este modo la oferta de subproductos generados (agua, fango, nutrientes, energía...) con la demanda y por consiguiente avanzando en el marco de la economía circular.

## 4.1. Digitalización orientada a la gestión del proceso

4.1.1. **Monitorización de los efluentes:** Proporcionan datos en relación con los caudales o características fisicoquímicas del agua. El control de los contaminantes que contiene el agua residual es de suma importancia en lo que respecta a las tareas de operación, mayores cargas contaminantes implican variaciones en el uso de reactivos y energía. La incorporación de sensores permite mediar la carga orgánica del agua residual en tiempo real, los sensores pueden ser colocados a la entrada del influente, al final de cada tratamiento (primario y biológico) y a la salida del efluente. Los datos generados permiten realizar un seguimiento de los distintos parámetros, adecuando de este modo los tratamientos (reactivos y otros) y minimizando posibles desviaciones debidas a variaciones externas (como vertidos y precipitaciones) (Matheri et al. 2022, Hernández-Chover et al. 2022a). Además, es posible monitorizar datos relacionados con otras características externas que puedan afectar al proceso de tratamiento, como las variables climatológicas y datos relacionados con los costes del proceso.

4.1.2. **Gestión de activos:** La digitalización posibilita la gestión centralizada de los diversos activos que conforman estas infraestructuras. A través de la monitorización constante y la aplicación de algoritmos, se logra reducir los riesgos de fallos y los costos asociados a lo largo del ciclo de vida, basándose en datos históricos. La confiabilidad de estos activos puede ser evaluada mediante enfoques como el "machine learning", que aprovecha todos los datos disponibles para identificar anomalías y determinar posibles causas de los fallos. Además, estos algoritmos permiten estimar el tiempo promedio hasta el fallo y se pueden integrar con otros sistemas de gestión de mantenimiento computarizado para programar órdenes de trabajo y verificar la disponibilidad de repuestos (Caldera et al. 2021). La capacidad de reconocimiento de patrones y detección de anomalías, mediante el análisis predictivo, se aplica tanto a los activos como a los procesos de tratamiento. Esto permite identificar y responder de manera ágil a posibles fallos en los activos y a las ineficiencias y anomalías en los procesos. Como resultado, se

reducen los tiempos de inactividad, se evita el incumplimiento de las normativas sobre efluentes, se optimiza el consumo de energía y productos químicos, y se minimiza la necesidad de mano de obra, entre otros beneficios.

4.1.3. **Información geoespacial:** Estos datos proporcionan visibilidad sobre el flujo de materiales, componentes, productos y personas. El análisis de estos datos puede agregar tiempos, potenciando las posibilidades de uso. Por ejemplo, permite detectar picos y valles de demanda de agua y, en consecuencia, energía. Prevenir posibles inundaciones urbanas, detectar patrones de generación de agua residual anómalos, deficiencias en la generación de residuos, optimizar rutas del personal implicado en las tareas de las EDARs o advertir de incidencia de virus en la población delimitando zonas geográficas concretas (Tscharke et al. 2019).

4.1.4. **Optimización de la energía y emisiones asociadas:** Los procesos de tratamiento de aguas residuales conllevan un consumo significativo de energía. Estudios recientes indican que aproximadamente el 25% al 40% de los costes operativos de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (EDAR) están directamente relacionados con el consumo de energía (Castellet-Viciano et al. 2018). Los componentes principales que consumen esta energía incluyen los sistemas de aireación (que representan entre el 55% y el 70%), las bombas utilizadas para transportar el agua residual a los decantadores primarios y secundarios (15%), y el proceso de secado de fangos (7%). Es importante destacar que muchos de estos motores, bombas y equipos operan de manera continua, las 24 horas del día y los 7 días de la semana, lo que sitúa a las EDAR entre los principales consumidores de energía. Enfrentar este desafío es crucial, y una de las soluciones prometedoras es la reducción del consumo energético en estas instalaciones. La digitalización juega un papel esencial en esta tarea al permitir el uso de sistemas de control y algoritmos matemáticos para ajustar y optimizar, por ejemplo, los requerimientos de aireación en los procesos biológicos de tratamiento. Los beneficios resultantes incluyen una mayor estabilidad en el proceso de tratamiento y una disminución de los costes

operativos, lo que contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de las EDAR.

4.1.5. **Gestión de fangos generados:** El tratamiento de las aguas residuales genera grandes cantidades de lodos, los cuales deben ser gestionados dentro de la misma instalación antes de su disposición final. El propósito del tratamiento de estos lodos es reducir su contenido de agua, eliminar patógenos y garantizar la estabilidad de la materia orgánica. Estos lodos se almacenan para su posterior uso como fertilizantes vegetales o enmiendas para el suelo, lo que está en línea con los principios ambientales de reciclaje y valorización de residuos. Es importante destacar que los costes asociados con la gestión de los lodos pueden representar hasta el 50% de los costes operativos totales de una EDAR, por lo que es fundamental mantener un control efectivo de estos procesos con el fin de reducir los gastos (Siatou et al. 2020). La monitorización y la automatización de las etapas y procesos relacionados con la gestión de los lodos permiten realizar varias acciones beneficiosas, como prever la producción de lodos, cuantificar el contenido de materia orgánica para su valorización y minimizar el volumen total de lodos generados, lo que a su vez optimiza y maximiza la utilización de estos lodos en el proceso. Esta mejora en la gestión de lodos no solo reduce los costes operativos, sino que también contribuye a una gestión más sostenible y eficiente de las EDAR.

#### 4.2. Digitalización orientada a los canales de comercialización

La aplicación del enfoque de economía circular permite transformar una EDAR tradicional en una “Bio-factoría” que recupera materiales, bioplásticos, enzimas, nutrientes y energía de las aguas residuales, creando así circuitos de retroalimentación de recursos y mejorando al mismo tiempo la calidad del agua vertida (Puchongkawarin et al. 2015). Unos recursos que además de aportar sostenibilidad permiten ser generados de manera continua, pudiendo reemplazar parte de los recursos naturales usados. Por ejemplo, en el caso del fósforo, en mayo de 2014, la Comisión Europea lo catalogó como materia prima crítica, por lo que las fuentes alternativas han ganado importancia (Ferro and Bonollo

2019, Hernández-Chover et al. 2022b). Estimaciones recientes en cuando al consumo de fósforo, muestran que usando tecnologías disponibles podemos recuperar hasta el 30% del mineral utilizado actualmente en la agricultura para el 2030 (Radini et al. 2021). El nitrógeno es otro nutriente de elevada importancia en la agricultura, al igual que el fósforo puede ser recuperado del agua residual, aportando de este modo una materia prima inagotable. Entre otros ejemplos, el recurso por excelencia que las EDARs son capaces de generar es agua, convenientemente tratada puede ser regenerada hasta alcanzar los criterios de calidad exigidos según su uso. En un contexto de cambio climático la regeneración de agua permite disponer de unos recursos hídricos propios, aportando autosuficiencia, fiabilidad y garantía de suministro. En este sentido, entornos industriales con elevada dependencia del agua pueden garantizar su sostenibilidad empleando agua regenerada en sus procesos industriales, como puede ser el caso del sector cerámico en la región mediterránea (Hernández-Chover et al. 2022b).

En este sentido, generar canales de distribución que conecten la oferta de recursos y su demanda es de suma importancia para garantizar que los productos y recursos se utilicen de manera eficiente y sostenible. La digitalización y las técnicas de análisis de datos son relevantes para optimizar el sistema y garantizar su funcionamiento.

#### 4.2.1. Distribución de agua

Garantizar una cantidad y calidad adecuadas del suministro de agua es un desafío en muchas zonas del mundo debido a factores como el cambio climático, la contaminación del agua y el rápido crecimiento del consumo de agua. En este sentido, a medida que aumenta la industrialización en los países en desarrollo, el uso industrial del agua podría intensificarse, sometiendo los recursos hídricos a una grave tensión. En la actualidad, la aplicación de diversos tratamientos fisicoquímicos permite utilizar las aguas residuales para otros fines. Los últimos estudios muestran cómo el desarrollo tecnológico actual permite adaptar el agua regenerada a diferentes finalidades, pudiendo utilizarse directamente para usos que requieran criterios de calidad más estrictos o para otros procesos sometidos a menores requisitos de calidad. En definitiva, el uso de agua regenerada supone liberar

recursos de mejor calidad para usos más restrictivos en relación con la calidad requerida.

La digitalización permite proyectar los volúmenes de agua que las infraestructuras van a recibir con demandas de agua y calidades asociadas, ya sea para uso agrícola o industrial. Conectar la oferta de agua regenerada con la demanda permite adecuar la calidad del agua residual a los criterios exigidos, pudiendo de este modo ofertar distintas calidades (a, b, c, etc.). La distribución de distintas calidades de agua regenerada permite optimizar su uso a la par que regenerar únicamente los volúmenes de cada calidad que van a ser suministrados. Gracias a la digitalización y posterior análisis de datos, los consumos, así como los precios asociados al agua pueden tener un comportamiento dinámico, adaptándose de este modo la oferta y la demanda en tiempo real.

#### 4.2.2. Distribución de nitrógeno y fósforo

El nitrógeno y el fósforo son dos nutrientes importantes presentes en las aguas residuales, pero si se liberan en exceso en cuerpos de agua naturales, pueden causar problemas ambientales como la eutrofización, que es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en el agua. En el sector agrícola el fósforo y el nitrógeno son los principales nutrientes empleados como fertilizantes, en este sentido, la ONU reclama medidas para usar mejor este fertilizante y producirlo de forma sostenible, extrayéndolo de las aguas residuales. De acuerdo con la ONU, la roca fosfórica es la principal fuente de fósforo que existe en el mundo para la producción de fertilizantes sintéticos. Sin embargo, su disponibilidad es cada vez más limitada y, con una población en aumento, es posible que sea insuficiente para satisfacer las demandas agrícolas y, en definitiva, alimentarias.

Las estaciones depuradoras son capaces de extraer ambos minerales (estruvita); un mineral con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, además de magnesio. Ya son numerosos los países que lo utilizan como fertilizante para los campos de cultivo por sus ventajas (lenta disolución), además de que disminuye el riesgo de contaminación del agua.

Si atendemos al mercado actual de fertilizantes, los precios de referencia internacionales han ido aumentando a lo largo de todo 2021, y muchas cotizaciones han alcanzado sus máximos históricos. Los precios de los fertilizantes vienen determinados por la interacción de la oferta y la demanda. Por lo que respecta a la oferta, i) los elevados y cada vez mayores precios de la energía y ii) las perturbaciones en el comercio y los elevados costes del transporte, mientras que por lo que respecta a la demanda, iii) los elevados precios de los cultivos y, por lo tanto, un nivel de asequibilidad alto.

El uso de técnicas de análisis de datos permite conocer las cotizaciones diarias de los fertilizantes y, en consecuencia, ajustar el precio de los fertilizantes producidos en las EDARs con tal de optimizar su distribución a nivel agrícola. Esta información puede venir definida en etapas anteriores del proceso de tratamiento de aguas residuales, conocer las características y el volumen de agua que entra en la planta permite proyectar las cantidades de fertilizantes que podremos ofrecer al mercado, permitiendo planificar y abastecer la demanda de éstos.

#### 4.2.3. Distribución de fangos

Los fangos generados en las EDARs son subproductos sólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales. Estos fangos, también conocidos como lodos o biosólidos, son el resultado de la eliminación de sólidos y materia orgánica durante el proceso de depuración del agua. Son ampliamente usados como fertilizantes de suelos agrícolas (Hurley et al., 2018; Magni et al., 2019).

En cuanto a las demandas agrícolas, estos fangos se utilizan a menudo como fertilizantes orgánicos en la agricultura. Contienen nutrientes valiosos como nitrógeno, fósforo y materia orgánica que pueden mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de cultivos. En función del proceso que han sufrido, podemos definir distintos tipos de lodo:

Lodo tratado: son los lodos residuales procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas o urbanas y de aguas residuales de composición asimilable a urbana, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, tratados por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzca, de manera significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización.

Lodo deshidratado: son los lodos tratados sometidos a un proceso de pérdida de agua por procedimientos físico-mecánicos o térmicos previos a su utilización en la agricultura. Los contenidos en humedad suelen ser superiores al 80%.

Lodos pastosos: son los lodos deshidratados con un contenido en materia seca entre 30-50%.

Lodos secados: son lodos tratados con un contenido en humedad inferior al 70%.

Lodos secados térmicamente: son lodos tratados con un contenido en humedad inferior al 10%.

Lodos compostados: son los lodos tratados sometidos a un proceso de transformación biológica aerobia, con la finalidad de obtener un producto estable y no fitotóxico. El compostaje se realiza con adición de otros residuos o productos.

Su uso debe realizarse siguiendo pautas y regulaciones, como considerar la calidad y composición de los fangos para determinar la cantidad adecuada a aplicar a los campos agrícolas. En el sector agrícola, contribuye a aliviar la salud de los suelos deficitarios de materia orgánica, mejorando sus características y dotándolos de una mayor capacidad para protegerse de la erosión, y en último término de la desertificación.

Implementar la digitalización permite optimizar el canal de distribución del fango. Existen diferentes variables que pueden ser monitorizadas para

automatizar los envíos, ajustando las cantidades y calidades al terreno agrícola. Además, la localización geográfica puede ser de gran ayuda para optimizar las rutas de transporte, minimizando los tiempos totales de transporte y en consecuencia costes económicos y emisiones asociadas. Por otro lado, los precios económicos asociados al fango pueden variar y adaptarse a las condiciones del mercado, de modo que una mayor demanda de fangos puede generar leves aumentos de precio y viceversa, entre otros aspectos.

#### 4.2.4. Distribución de energía

Generar energía eléctrica en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) es una práctica que puede ser beneficiosa tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. Para este fin, existen distintas tecnologías cuya elección depende de diversos factores, como como la disponibilidad de recursos (como lodos de tratamiento), el flujo de aguas residuales, la ubicación geográfica y los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética de la planta. En general, la energía generada en una EDAR proviene de fuentes renovables, como la digestión anaerobia de lodos y la captura de biogás. Una vez generada existen distintas opciones de distribución:

**Autoconsumo:** La energía generada en una EDAR se utiliza en su mayoría para el autoconsumo de la planta. Esto implica alimentar los equipos y sistemas necesarios para el funcionamiento de la EDAR, como las bombas, los sistemas de aireación y los sistemas de control.

**Alimentación de instalaciones cercanas:** En algunos casos, la energía generada en la EDAR puede utilizarse para alimentar instalaciones cercanas, como edificios municipales, parques o incluso comunidades cercanas. Esto podría hacerse mediante acuerdos con las autoridades locales.

**Almacenamiento:** Si se dispone de sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, la energía generada en la EDAR puede almacenarse para su

uso posterior. Esto permite una mayor flexibilidad en la gestión de la energía y su distribución según las necesidades.

Inyección a la red eléctrica: En algunas EDARs, si se produce un exceso de energía, esta puede ser inyectada en la red eléctrica local. Esto puede generar ingresos adicionales para la instalación a través de contratos de venta de energía.

Calefacción: El calor generado durante el proceso de digestión anaerobia de lodos puede utilizarse para calefaccionar los edificios de la planta o para calentar el proceso de tratamiento de aguas residuales en climas fríos.

Generación de vapor: En ciertas EDARs, la energía generada se utiliza para generar vapor que, a su vez, puede utilizarse en diversas aplicaciones, como la generación de electricidad adicional o la calefacción de procesos industriales.

Venta de créditos de energía renovable: En algunas áreas, las EDARs pueden vender créditos de energía renovable o certificados de energía limpia como parte de programas de sostenibilidad o para cumplir con requisitos de energía renovable establecidos por el gobierno o reguladores.

## 5. La digitalización aplicada a los canales de distribución y comercialización

El presente apartado plantea el uso de la digitalización en el sector de la depuración de las aguas residuales. Como se ha explicado anteriormente, la digitalización ofrece un gran número de ventajas, partiendo de la monitorización de los elementos y los procesos de producción permite obtener información y, en consecuencia, optimizar la gestión integral de las estaciones y del sector de la depuración en su conjunto. En trabajos anteriores, el grupo de Economía del agua desarrolla precisamente diversas aproximaciones al uso de la digitación orientada a la gestión de las infraestructuras. Se resumen las enormes posibilidades que ofrece la monitorización del agua, la energía, los reactivos, las condiciones climáticas y un gran número de aspectos que podríamos entender como intrínsecos del proceso de depuración. La suma de todos estos aspectos permite

conseguir, en lo que a gestión se refiere, una mayor eficiencia en el uso de los recursos. Sin embargo, en el marco de la economía circular, debemos entender que las estaciones depuradoras son bio-factorías capaces de ofrecer una gran variedad de recursos a la sociedad. Este último aspecto resulta de elevada importancia y por este motivo el presente caso de ejemplo evalúa la circularidad aplicando una óptica económica que analiza la potencialidad de la tecnología en lo que respecta a la oferta y demanda de los recursos generados. En este sentido, la oferta de recursos viene definida por las EDARs y la demanda por los potenciales usuarios de agua, fangos, fertilizantes, electricidad y resto de posibles recursos que seamos capaces de generar.

Hablar de oferta y demanda implica toda una serie de conceptos relacionados con la microeconomía, las cantidades ofrecidas, el precio y su elasticidad así como las utilidades, ya sean totales o marginales que los agentes económicos son capaces de lograr en el intercambio de los recursos generados.

Este último aspecto hace referencia al equilibrio de mercado, es necesario igualar las cantidades y precios ofrecidos entre ambos agentes, en este caso particular los agentes económicos que intervienen son estaciones depuradoras como oferentes y los consumidores de estos recursos, como demandantes (agricultores, industrias, servicios públicos...). Los agricultores pueden usar el agua previamente regenerada para el riego de los cultivos y/o los fertilizantes (nitrógeno y fósforo) en sustitución de los actuales fertilizantes industriales. Por otro lado, algunas industrias, como la cerámica, papel o textil, requieren elevadas cantidades de agua para sus procesos industriales, por lo que esta fuente de agua no convencional representa un recurso estratégico en algunas zonas con estrés hídrico o lugares donde el agua tiene una elevada concentración de contaminantes. Otro agente económico son los servicios públicos, requieren agua para el riego de parques, jardines y baldeos de calles, por lo que este recurso puede provenir de las estaciones de depuración de aguas residuales, disminuyendo de este modo la presión sobre el recurso natural. Además, la electricidad producida por cogeneración puede ser utilizada en la propia planta o inyectada en la red para su uso en alumbrado público, energía limpia que, recordemos, evita la emisión de gases de efecto invernadero. Estos son algunos de los ejemplos de como la EDAR puede jugar un papel estratégico, ofreciendo toda una serie de recursos capaces de sustituir a los actuales y, por

consiguiente, avanzando en la implementación de la economía circular en el sector. En este sentido, el análisis de las diversas potencialidades que la digitalización ofrece en el canal de comercialización sirve como ejemplo ilustrativo e incentivador para numerosas empresas del sector, ofreciendo un punto de vista que logra enriquecer las potencialidades que la digitalización aporta al mercado, maximizando de este modo la utilidad de los recursos generados.

Los ejemplos expuestos anteriormente requieren de una gran cantidad de datos, el equilibrio entre la oferta y la demanda exige, además de monitorizar los procesos que intervienen en la planta, tener en cuenta otras muchas variables del mercado. Es importante señalar que en la función de demanda de los recursos generados intervienen aspectos relacionados con las necesidades actuales, cantidades y precios entre otras variables. El éxito de este equilibrio entre oferta y demanda requiere de la relación, combinación y aprendizaje continuo de un gran número de variables que intervienen en el mercado.

En este sentido, una de las metodologías que mayores beneficios están aportando a la industria del sector del agua es el Machine learning. Tal y como se explica en apartados anteriores, esta metodología permite proyectar escenarios a partir de datos y historiales de las empresas. La integración de múltiples datos, ya sean cuantitativos o cualitativos consigue encontrar patrones y tendencias que resultan de gran valor para los gestores debido a que anticipan los resultados, minimizando la incertidumbre en la toma de decisiones. Por otro lado, la previsión de la demanda de los recursos generados por la planta permite maximizar los beneficios obtenidos por la venta de estos recursos debido a la adaptación de los precios al mercado, que habitualmente es dinámico. La escasez de los recursos naturales unida a la variabilidad de los costes que intervienen en su transformación, energía, combustibles etc. eleva la dinamicidad de los precios finalmente ofrecidos. Estos últimos años, los incrementos en las tarifas energéticas o los carburantes han lastrado al alza los precios de las materias primas y, por consiguiente, los precios de los productos, afectando de este modo a la demanda.

La demanda del mercado viene definida como la suma de los productos o servicios que los consumidores están dispuestos y son capaces de adquirir a un precio y en un momento dado, por lo que la producción, el precio y la disponibilidad de estos productos juega un

papel relevante en la función. Conocer la demanda permite segmentar a los clientes según sus necesidades o preferencias, ajustando de este modo los precios a las diferentes variables que intervienen; precios de productos sustitutivos, factores demográficos, cantidades requeridas, cambios en las condiciones económicas y el volumen de ingresos de nuestros consumidores entre otras variables. El conjunto de aspectos que intervienen obliga en muchas ocasiones a optimizar el canal de distribución y comercialización, en el caso de ejemplo, la optimización de las rutas de distribución y comercialización de fangos, agua, fertilizantes o electricidad permite minimizar los costes maximizando de este modo el beneficio generado a la par que, disminuyendo las emisiones generadas, en caso de requerir combustible para su transporte.

Entendiendo las estaciones depuradoras como bio-factorías capaces de ofrecer múltiples recursos, la digitalización permite alinear la oferta de recursos/productos y la demanda de éstos por parte de otros sectores. Por ejemplo, las depuradoras generan elevadas cantidades de fango que puede ser aprovechado por los agricultores próximos a la planta, el coste del fango puede variar dependiendo de los productos sustitutivos, como pueden ser los abonos nitrogenados, cuyo coste ha incrementado estos últimos años debido precisamente a la escasez de recursos y los elevados costes energéticos que implica su transformación. En este sentido, el precio del bien sustitutivo (abonos nitrogenados) permite ajustar el precio del recurso generado (fangos), de modo que las metodologías de Machine learning pueden anticipar tanto el precio del recurso generado, como la cantidad y calidad ofrecida.

Los resultados generados son dinámicos debido a que las variables de las que depende fluctúan continuamente. Entre las variables necesarias para la modelización se encuentran: el volumen de agua residual tratado, la concentración de contaminantes, los costes del proceso (energía, reactivos, personal), el precio del bien sustitutivo y otras variables relacionadas con la demanda (cantidad, distancia y calidad demandada). Tal y como se puede intuir, los tomadores de decisiones conocerían con anticipación las cantidades que pueden ofrecer al mercado, así como los precios asociados, con tal de ofrecer finalmente un recurso que coincida con la demanda usando el precio como incentivo para su uso.

Otro de los recursos generados por las EDAR son los fertilizantes (nitrógeno y fósforo), éstos pueden ser recuperados gracias a las tecnologías actuales, de nuevo, conocer la calidad del agua residual a la entrada de la planta, el volumen tratado y las variables económicas asociadas tanto al recurso generado como a los fertilizantes industriales (recursos sustitutivo) permitiría ofrecer unas cantidades concretas y precios alineados con los intereses de los potenciales usuarios (principalmente agricultores). Además, la posibilidad de almacenar estos recursos permitiría ajustar las cantidades ofrecidas según los precios de mercado, maximizando en este último caso los beneficios generados.

Siguiendo con el ejemplo, uno de los recursos con mayor valor que genera una EDAR es agua, una vez depurada puede ser regenerada con tal de ajustar la calidad del recurso a distintos usos (agrícolas, industriales y servicios públicos). Con tal de adaptar el recurso a los distintos usos, es posible diferenciar dos calidades generales, en primer lugar, agua depurada sometida a un tratamiento terciario que puede ser apta para determinados usos como la limpieza de equipos o instalaciones y otros procesos que no requieren agua de alta calidad, siendo el tratamiento más económico y, en segundo lugar, agua regenerada de alta calidad obtenida a partir de un tratamiento terciario avanzado con sistema de membranas.

De este modo, la EDAR puede ofrecer dos calidades y, por consiguiente, dos precios distintos ajustados a los costes generados en los procesos de tratamiento. En este caso, las tarifas propuestas se fijan a partir de las tarifas de los suministros actuales, asegurando un margen industrial para garantizar la sostenibilidad del proyecto (Hernandez Chover V. et al., 2022). En el caso de España, cada municipio diseña sus propias tarifas, que son gestionadas por los ayuntamientos, que delega o comparte con empresas privadas y que son los encargados de fijar la estructura tarifaria y los precios a cobrar a los usuarios. Esto puede provocar diferencias en los precios que pagan los usuarios en las distintas comunidades autónomas, provincias e incluso a nivel local.

Siguiendo la fijación de precios basados en la competencia, las regiones y municipios donde las empresas pagan el precio más alto por el agua ( $m^3$ ) son, en términos estratégicos, usuarios potenciales para la implementación de proyectos de reutilización del agua. Sin embargo, son los aspectos relacionados con los costes del proyecto los que finalmente determinan el precio mínimo para alcanzar la viabilidad económica.

Estos son algunos de los casos en los que la potencialidad de la digitalización permite avanzar en la integración de la economía circular en el sector de las aguas residuales e incluye principalmente aquellas variables relacionadas con la oferta y la demanda de los recursos generados teniendo en cuenta los aspectos del mercado. El uso del Machine learning permite anticipar las cantidades producidas así como ajustar los precios siguiendo la tendencia del mercado, maximizando los beneficios en el canal y convirtiendo los recursos no convencionales como un factor estratégico en términos de sostenibilidad.

## 6. Bibliografía

Adesanwo, M., Bello, O., Lazarus, S., & Denney, T., 2017. Smart alarming for intelligent surveillance of Electrical Submersible Pump Systems. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.

Barteková, E. and P. Börkey., 2022. "Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy", OECD Environment Working Papers, No. 192, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en>.

Brown C. and Lall U., 2006. Water and economic development: The role of variability and a framework for resilience. *Natural Resources Forum*, 30:306-317.

Bouwman, H., de Reuver, M. and Shahrokh, N. (2017), "The impact of digitalization on business models: how IT artefacts, social media, and big data force firms to innovate their business model", 14th International Telecommunications Society (ITS) Asia-Pacific Regional Conference, Kyoto, June 24-27.

Caldera S., Mostafa S., Desha C. and Mohamed S., 2021. Exploring the Role of Digital Infrastructure Asset Management Tools for Resilient Linear Infrastructure Outcomes in Cities and Towns: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13.

Castellet-Viciano L., Hernández-Chover V., Bellver-Domingo Á and Hernández-Sancho F., 2022. Industrial Symbiosis: A Mechanism to Guarantee the Implementation of Circular Economy Practices. *Sustainability (Switzerland)*, 14.

Castellet-Viciano L., Hernández-Chover V. and Hernández-Sancho F., 2018. Modelling the energy costs of the wastewater treatment process: The influence of the aging factor. *Science of the Total Environment*, 625:363-372.

Chen, R.C.; Dewi, C.; Huang, S.W.; Caraka, R.E., 2020. Selecting critical features for data classification based on machine learning methods. *Journal of Big Data*, 2020; 7: 52

Ferro P. and Bonollo F., 2019. Materials selection in a critical raw materials perspective. *Materials & Design*, 177:107848.

- Gherghel A., Teodosiu C. and De Gisi S., 2019. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 228:244-263.
- Hernández-Chover V., Castellet-Viciano L., Bellver-Domingo Á and Hernández-Sancho F., 2022. The Potential of Digitalization to Promote a Circular Economy in the Water Sector. *Water*, 14.
- Hernández-Chover, V.; Castellet-Viciano, L.; Hernández-Sancho, F., 2022. A Tariff Model for Reclaimed Water in Industrial Sectors: An Opportunity from the Circular Economy. *Water* 14, 3912. <https://doi.org/10.3390/w14233912>
- Hernández-Chover, V., Castellet-Viciano, L., and Hernández-Sancho, F., 2019. Cost analysis of the facilities deterioration in wastewater treatment plants: A dynamic approach. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101613.
- Hurley, R.R., Nizzetto, L., 2018. Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 1: 6–11.
- Leung K.H., Luk C.C., Choy K.L., Lam H.Y. and Lee C.K.M., 2019. A B2B flexible pricing decision support system for managing the request for quotation process under e-commerce business environment. *International Journal of Production Research*, 57:6528-6551.
- Liu W., He S., Mou J., Xue T., Chen H. and Xiong W., 2023. Digital twins-based process monitoring for wastewater treatment processes. *Reliability Engineering & System Safety*:109416.
- López, J., López, B., & Díaz, V. (2004). Algoritmo de aprendizaje por refuerzo continuo para el control de un sistema de suspensión semi-activa. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 9(2), 77-91.
- Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., Avio, C.G., Della Torre, C., Parenti, C.C., Gorbi, S., Regoli, F., 2019. The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment* 652: 602–610.
- Matheri A.N., Mohamed B., Ntuli F., Nabadda E. and Ngila J.C., 2022. Sustainable circularity and intelligent data-driven operations and control of the wastewater treatment plant. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 126:103152.
- Mazur-Wierzbicka, E., 2021. Circular economy: advancement of European Union countries. *Environmental Sciences Europe*, 33, 1-15.
- Paulus-Rohmer, D., Schatton, H. and Bauernhansl, T., 2016. Ecosystems, strategy, and business models in the age of digitization – how the manufacturing industry is going to change its logic, *Procedia CRIP*, Vol. 57 No. 2016, pp. 8-13.

Puchongkawarin C., Gomez-Mont C., Stuckey D.C. and Chachuat B., 2015. Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery. *Chemosphere*, 140:150-158.

Radini S., Marinelli E., Akyol Ç, Eusebi A.L., Vasilaki V., Mancini A., Frontoni E., Bischetti G.B., Gandolfi C., Katsou E. and Fatone F., 2021. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations. *Applied Energy*, 298:117268.

Siatou A., Manali A. and Gikas P., 2020. Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12:1204.

Tscharke B.J., O'Brien J.W., Ort C., Grant S., Gerber C., Bade R., Thai P.K., Thomas K.V. and Mueller J.F., 2019. Harnessing the Power of the Census: Characterizing Wastewater Treatment Plant Catchment Populations for Wastewater-Based Epidemiology. *Environmental science & technology*, 53:10303-10311.

UN, 2019. We're gobbling up the Earth's resources at an unsustainable rate. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/493-were-gobbling-earths-resources-unsustainable-rate/>. [Online; accessed 01-July-2022].

World Water Assessment Programme (United Nations); UN-Water. *Water in a Changing World; The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*: Paris, France, 2009.

Zhang, Y.; Grant, A.; Sharma, A.; Chen, D.; Chen, L., 2010. Alternative water resources for rural residential development in Western Australia. *Water Resour. Manag.* 24, 25–36.