

Digitalización y el papel del PERTE en la transformación del sector del Ciclo Integral del Agua.

Julio 2026



Javier Climent Agustina
javier.climent@hydrens.com

<https://www.linkedin.com/in/javier-climent/>

<https://orcid.org/0000-0002-6699-0794>



Manuel J. González Ortega
mgortega@us.es

ingenierocayma@gmail.com

<https://www.linkedin.com/in/manuel-j-gonzalez-4b3b978/>

<https://orcid.org/0000-0001-6163-358X>

Índice

1. Introducción.....	3
2. ¿Qué es la digitalización del ciclo integral del agua?.....	3
2.1. ¿Qué es la digitalización del ciclo integral del agua?.....	3
2.2. Del dato a la decisión.....	4
3. Niveles y madurez de la digitalización.....	5
3.1. El modelo de madurez digital del operador. El marco MAD.....	5
3.2. El ciclo de sobreexpectación de Gartner aplicado a la digitalización del agua.....	8
4. La gestión del dato.....	9
4.1. Arquitectura por capas.....	9
4.2. Interoperabilidad y estándares.....	10
4.3. Gobernanza del dato.....	10
4.4. La calidad del dato.....	10
4.5. Ciberseguridad y continuidad operativa.....	10
5. Los famosos Gemelos digitales, ¿qué son y para qué sirven?.....	11
5.1. Definición y consenso.....	11
5.2. El gemelo físico, el gemelo fenomenológico y la interpretabilidad.....	11
5.3. ¿Es un BIM o un GIS un gemelo digital?.....	12
5.4. Tipologías por escala y alcance.....	14
5.5. Funcionalidades del gemelo digital.....	14
5.6. El gemelo digital como núcleo del sistema de soporte a la decisión.....	14
6. Herramientas innovadoras.....	16
7. El PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua.....	19
7.1. Convocatorias y cifras movilizadas.....	19
7.2. La cuestión supramunicipal.....	21
7.3. Barreras de adopción.....	21
8. Casos de estudio reales.....	22
8.1. Gemelos digitales en el abastecimiento de Barcelona.....	22
8.2. SWIM: gemelos digitales con LoRaWAN e IA para redes de distribución.....	22
8.3. Gemelo Digital de alta precisión aplicado a EDAR.....	22
8.4. La Confederación Hidrográfica del Guadiana y su integración en alta.....	23
8.5. Integración en alta implementación BIM de presas de titularidad estatal, C.H. EBRO.....	24
8.6. CREANDO: digitalización del saneamiento en el área metropolitana de Sevilla (EMASESA).....	25
8.7. Lecciones transversales.....	26
9. Innovación y trabajo a desarrollar en los próximos años.....	27
10. Conclusiones.....	28
11. Referencias.....	30

1. Introducción.

El agua es, simultáneamente, un recurso escaso, un servicio esencial y una infraestructura crítica. Las tres condiciones se tensionan al mismo tiempo. La disponibilidad del recurso disminuye y se vuelve más irregular por efecto del cambio climático; las redes envejecen y acumulan fugas; los costes energéticos del bombeo y el tratamiento crecen; y las obligaciones regulatorias sobre fugas, vertidos, desbordamientos y calidad del agua son cada vez más exigentes. La gestión tradicional, basada en inspecciones periódicas, datos agregados y experiencia acumulada, resulta insuficiente para operar sistemas cada vez más complejos y sometidos a mayor escrutinio.

En este contexto, la digitalización se ha convertido en la palanca de modernización más relevante del sector, siendo impulsada en España, principalmente, a través del PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua. Sin embargo, hay que partir de una idea fundamental, y es que digitalizar no es lo mismo que comprar tecnología. El riesgo, o el error real, ampliamente documentado, es confundir la transición digital con la mera acumulación de sensores y datos desconectados del conocimiento de los procesos físicos que gobiernan el sistema (Giustolisi, 2024). Una infraestructura puede estar repleta de sensores y seguir siendo opaca porque es la verdadera gestión de la información, la que hace que la digitalización tenga un sentido con objetivo real y operativo.

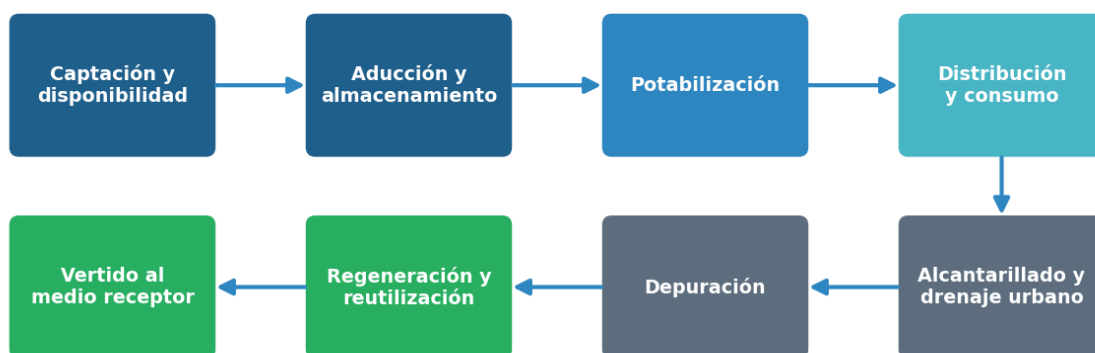
Es necesario poner encima de la mesa, un análisis crítico de cómo se inició la digitalización del sector, qué impacto han tenido los PERTE durante estos últimos años, y si realmente los casos de éxitos pueden aportar valor añadido al conocimiento.

2. ¿Qué es la digitalización del ciclo integral del agua?

2.1. ¿Qué es la digitalización del ciclo integral del agua?

El concepto de *ciclo integral* obliga a superar la fragmentación tradicional entre abastecimiento y saneamiento. Históricamente, la captación, la potabilización, la distribución, el saneamiento, la depuración y la reutilización se han gestionado como compartimentos estancos, a menudo por administraciones y operadores distintos. La digitalización bien entendida debe cubrir de manera coherente todas las etapas por las que circula el agua, desde su origen hasta su devolución al medio.

El ciclo integral del agua: continuidad hidráulica = continuidad informativa



La digitalización debe reconstruir el recorrido físico del agua y vincularlo a coste, calidad, energía e impacto ambiental

Figura 1 Etapas del ciclo integral del agua. La digitalización debe crear una continuidad informativa equivalente a la continuidad hidráulica del sistema.

La integración de estas etapas permite reconstruir el recorrido físico del agua y relacionarlo con sus costes, su calidad, su consumo energético y sus impactos ambientales. Este enfoque integral evita que cada instalación opere como una isla.

Por ejemplo, una estación de tratamiento de agua potable puede optimizar su propia producción y, sin embargo, no optimizar el sistema completo si desconoce la calidad y disponibilidad en la captación, la demanda real, el nivel de los depósitos o las pérdidas en distribución. Del mismo modo, una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) puede cumplir sus límites de vertido y presentar un amplio potencial de optimización si se conoce y controla el sistema integral de saneamiento: caudales excesivos por infiltraciones, conexiones indebidas, vertidos incontrolados o aportaciones pluviales. La digitalización debe crear, por tanto, una continuidad informativa equivalente a la continuidad hidráulica del sistema.

2.2. Del dato a la decisión.

La evolución de la digitalización en el sector del agua ha seguido una trayectoria paralela a la experimentada por la industria en general. La denominada Industria 4.0 dominó la década de 2010 a 2019, con un enfoque centrado en la automatización, la conectividad y la digitalización de los procesos del ciclo del agua mediante sensores IoT, Big Data, sistemas SCADA y soluciones de telecontrol para la monitorización en tiempo real. Durante este periodo adquirieron especial relevancia las aplicaciones de análisis predictivo dirigidas a la reducción de fugas, la mejora de la eficiencia energética de los tratamientos y la optimización de las redes de abastecimiento y saneamiento, así como el desarrollo de los primeros gemelos digitales. Sin embargo, esta transformación no se ha producido de manera homogénea. El grado de sensorización, conectividad e integración de la información ha sido muy desigual entre los distintos ámbitos y operadores del ciclo integral del agua. No dispone de las mismas capacidades tecnológicas, económicas y organizativas una empresa metropolitana que presta servicio a millones de habitantes que una diputación provincial o una entidad supramunicipal encargada de apoyar la gestión del agua en numerosos municipios pequeños, con población dispersa, infraestructuras heterogéneas y recursos técnicos limitados. Por ello, aunque se han alcanzado avances muy significativos, todavía persisten importantes diferencias territoriales y organizativas, y resulta necesario continuar trabajando en la sensorización de las instalaciones, la interoperabilidad de los sistemas, la calidad de los datos y la capacitación de los operadores.

A partir de 2020-2021 se inició la transición hacia la Industria 5.0, caracterizada por una mayor integración entre tecnología, personas y sostenibilidad. El foco se desplazó hacia la resiliencia frente al cambio climático y los desastres naturales, la gestión holística del ciclo integral del agua, la protección del medio ambiente, la economía circular y la reutilización de los recursos hídricos. Esta etapa coincide, además, con el rápido desarrollo de la inteligencia artificial y, especialmente, con el auge de los algoritmos de aprendizaje automático, la inteligencia artificial generativa y los sistemas avanzados de apoyo a la decisión.

La incorporación de estas tecnologías ha ampliado notablemente las capacidades de la digitalización del sector, permitiendo identificar patrones complejos, anticipar averías y episodios de contaminación, optimizar la operación de infraestructuras, simular escenarios y generar recomendaciones en tiempo real. En este contexto, el gemelo digital deja de concebirse únicamente como una representación virtual de una infraestructura para convertirse en el "cerebro" de un sistema inteligente de soporte a la decisión. Mediante la integración de datos en tiempo real, modelos físicos, modelos basados en datos e inteligencia artificial, el gemelo digital ayuda a operadores y gestores a interpretar la información disponible, predecir el comportamiento del sistema, evaluar alternativas y adoptar decisiones más seguras, eficientes y sostenibles, manteniendo la supervisión humana como elemento central del proceso.

Conviene insistir en una idea que actúa como contrapunto crítico a todo el discurso digitalizador. Giustolisi (2024) advierte de que la transición digital debe entenderse como un camino progresivo en el que los datos y las herramientas digitales que los transforman en información deben ser proporcionados, en cantidad, calidad y complejidad, a los objetivos de eficiencia que se persiguen. Cuando esa proporcionalidad se rompe, la digitalización degenera en lo que el autor denomina "tráfico de tecnología y datos" o lo que es lo mismo un exceso de instrumentos de medida y de datos recopilados que no son representativos del fenómeno físico que se pretende mejorar y que terminan justificando el gasto en lugar de la inversión. Ese exceso, además, genera costes futuros de mantenimiento, consumo energético y gestión de información inútil. Lo que queda claro bajo mi perspectiva es que la innovación con propósito antecede a la tecnología, no al revés.

De la era de la información, donde el dato es el rey, la digitalización no es la toma del dato en sí, sino la cadena de valor que añade la gestión de esa información en la toma de decisiones. El dato bruto, almacenado en una base de datos que nadie consulta, no genera beneficio alguno; puede incluso generar coste y una falsa sensación de control. El valor aparece cuando el dato se valida, se contextualiza, se convierte en información comprensible y, a partir de ella, se toman decisiones que mejoran la operación. Esta cadena: medir, analizar y decidir, es el verdadero objeto de la digitalización.

Es importante subrayar que la transparencia no consiste en publicar grandes cantidades de información, sino en proporcionar datos comprensibles, contextualizados y verificables. Un cuadro de mando saturado de indicadores sin jerarquía ni propósito puede ser tan inútil como la ausencia total de medición.

3. Niveles y madurez de la digitalización

3.1. El modelo de madurez digital del operador. El marco MAD.

No todos los operadores parten del mismo punto ni necesitan alcanzar, al mismo tiempo, idéntico nivel de digitalización. Las prioridades dependen de factores como el tamaño de la entidad, la dispersión territorial de las infraestructuras, los recursos técnicos y económicos disponibles, el grado de sensorización existente y la complejidad de los servicios gestionados. Por ello, la digitalización debe planearse como un proceso progresivo, adaptado a las necesidades reales de cada organización.

Determinar el nivel de madurez digital de un operador constituye el primer paso para establecer una hoja de ruta viable, priorizar inversiones y evitar la implantación de soluciones tecnológicas que no puedan mantenerse o aprovecharse adecuadamente. De forma esquemática, pueden distinguirse cinco estadios principales:

1. **Instrumentación básica**, basada en la telemetría, el telemando y la supervisión de instalaciones o equipos aislados.
2. **Integración operacional**, mediante sistemas SCADA y plataformas de telecontrol que conectan diferentes instalaciones y permiten centralizar su supervisión desde uno o varios centros de control.
3. **Gestión y gobierno del dato**, que comprende el almacenamiento histórico, la validación, la trazabilidad, la contextualización y la integración de la información procedente de distintas fuentes en bases de datos interoperables.
4. **Analítica avanzada**, basada en indicadores, modelos físicos y estadísticos, algoritmos de detección de anomalías, análisis predictivo y herramientas de simulación y optimización.
5. **Inteligencia operativa**, en la que los datos, los modelos y el conocimiento del proceso se integran en gemelos digitales y sistemas de soporte a la decisión capaces de evaluar escenarios, anticipar comportamientos y recomendar actuaciones.

Estos niveles no deben entenderse como compartimentos estancos ni como una secuencia completamente rígida, ya que una organización puede presentar grados de desarrollo diferentes según el proceso, la instalación o el ámbito de gestión considerado. Sin embargo, las capacidades más avanzadas necesitan apoyarse en unas bases suficientemente consolidadas. La implantación de un gemelo digital, por ejemplo, difícilmente generará resultados fiables si previamente no se han resuelto la cobertura de la instrumentación, la calidad y persistencia de los datos, la interoperabilidad de los sistemas y la asignación de responsabilidades sobre su gestión.

La madurez digital no depende, por tanto, únicamente de la tecnología instalada. También requiere procedimientos de operación y mantenimiento, protocolos de validación, ciberseguridad, capacitación del personal, conocimiento del proceso y una estructura organizativa capaz de incorporar la información digital a la toma cotidiana de decisiones.

Una forma operativa de ordenar este proceso es el marco **Medir–Analizar–Decidir (MAD)**, que sintetiza las tres funciones esenciales de un sistema digital aplicado a la gestión del agua.

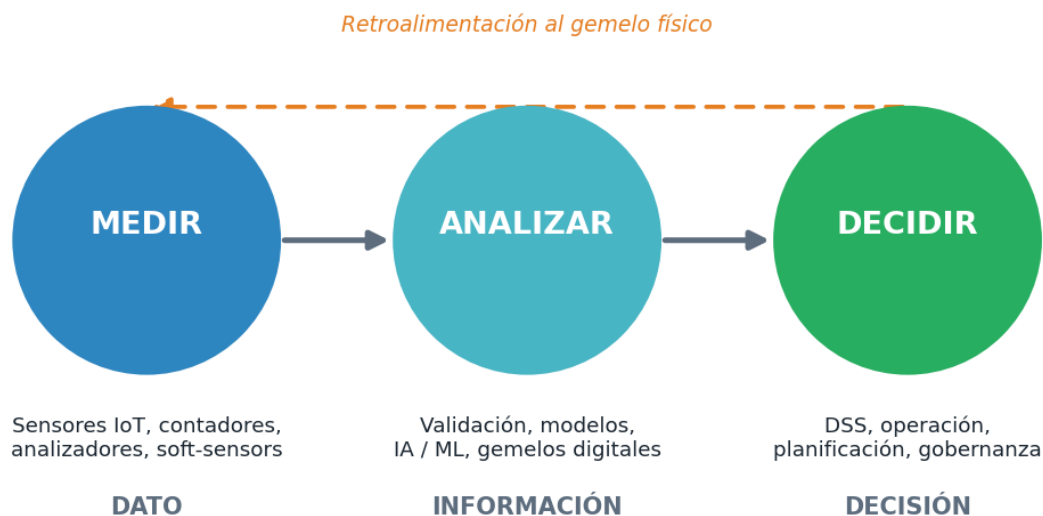


Figura 2 Marco MAD. La medición alimenta el análisis; el análisis sustenta la decisión, y la aplicación y evaluación de las decisiones generan una retroalimentación continua sobre el sistema físico y el propio modelo digital.

Medir

La medición se basa en una red de sensores distribuida de manera estratégica y diseñada en función de los procesos que se pretenden conocer y de las decisiones que deberán adoptarse. Cuando la medición continua o en línea no resulta técnica o económicamente viable, la información puede complementarse con análisis de laboratorio, campañas de aforo, inspecciones de campo, registros de operación o sensores virtuales *soft sensors*, que estiman variables no medidas directamente a partir de otras señales disponibles.

El diseño de la red de monitorización no debe comenzar preguntando cuántos sensores instalar, sino qué **información necesita el operador**. Para ello, es necesario identificar qué decisiones se quieren respaldar, qué variables condicionan esas decisiones, dónde existen zonas sin cobertura suficiente, qué frecuencia de adquisición resulta adecuada y qué nivel de precisión y fiabilidad se requiere.

La medición incluye, además, el mantenimiento, la calibración y la verificación periódica de los equipos. Un sensor instalado, pero no mantenido puede producir datos aparentemente precisos, aunque alejados de la realidad, y convertirse en una fuente de incertidumbre en lugar de conocimiento.

Analizar

El análisis constituye uno de los principales retos de la transformación digital. La instalación de sensores y sistemas de adquisición se encuentra relativamente estandarizada, pero convertir los datos obtenidos en información útil para la operación exige mayores capacidades técnicas y organizativas.

En muchos sistemas, una parte de los datos disponibles apenas se consulta después de su puesta en servicio o se utiliza exclusivamente para responder ante incidencias. Esta falta de uso sistemático reduce el valor de la instrumentación y dificulta la detección de errores, desviaciones o pérdidas de fiabilidad. Para evitarlo, los datos deben someterse a procesos de validación, depuración, contextualización y análisis periódico.

Extraer valor del dato requiere combinar conocimiento hidráulico, ambiental y operacional con competencias en estadística, modelización, programación e inteligencia artificial. Estas capacidades pueden desarrollarse dentro de la propia organización o incorporarse mediante equipos multidisciplinares y colaboraciones externas, pero deben mantenerse vinculadas al conocimiento de los procesos reales.

Los algoritmos, por sí solos, no sustituyen la experiencia del operador ni corrigen las deficiencias de una base de datos incompleta o de baja calidad.

Decidir

Decidir es la fase en la que la información obtenida se transforma en una actuación concreta. Puede consistir en modificar una consigna de operación, priorizar una inversión, programar una tarea de mantenimiento, anticipar una avería, activar una alarma o seleccionar la alternativa más adecuada ante un escenario determinado.

Para que la toma de decisiones basada en datos alcance un nivel operativo, las capacidades de medición y análisis deben haber superado un umbral mínimo de fiabilidad. A partir de ese punto, el principal desafío deja de ser exclusivamente tecnológico y pasa a ser también organizativo: es necesario definir qué información recibe cada responsable, con qué frecuencia, mediante qué indicadores y con qué criterios se adoptan, documentan y evalúan las decisiones.

La información debe integrarse en los flujos ordinarios de trabajo y no permanecer aislada en plataformas que solo consultan determinados perfiles técnicos. Los cuadros de mando, las alertas, los modelos y los sistemas de soporte a la decisión deben adaptarse a los distintos niveles de responsabilidad de la organización, desde la operación diaria hasta la planificación estratégica.

La aplicación de una decisión y la observación de sus resultados generan nuevos datos que permiten comprobar su eficacia, actualizar los modelos y mejorar las recomendaciones posteriores. Esta retroalimentación cierra el ciclo MAD y constituye la base funcional del gemelo digital. El cierre del bucle no implica necesariamente una actuación autónoma, todo depende de la criticidad del proceso, la decisión puede mantenerse bajo supervisión humana, ejecutarse de forma semiautomática o automatizarse dentro de unos límites previamente establecidos.

3.2. El ciclo de sobreexpectación de Gartner aplicado a la digitalización del agua

La adopción de tecnologías digitales en el agua no es lineal, sino que atraviesa fases de entusiasmo y desencanto bien en lo que se conoce como el ciclo de sobreexpectación de Gartner.

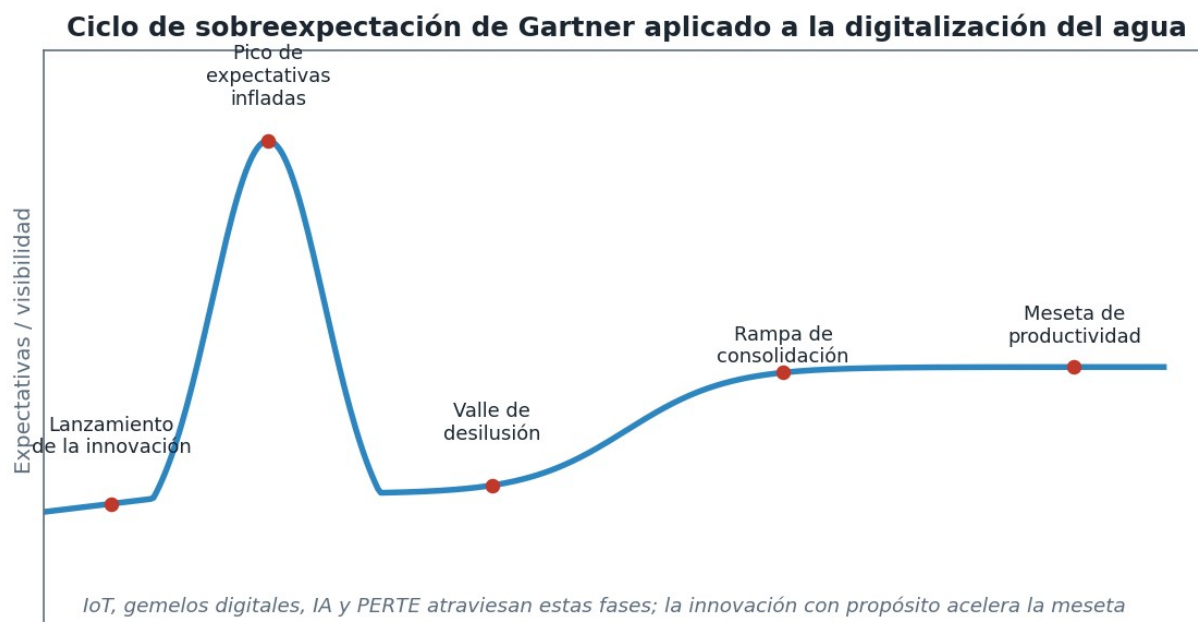


Figura 3 Las tecnologías digitales del agua atraviesan fases de entusiasmo, desilusión y consolidación antes de alcanzar la productividad.

Tras el **lanzamiento de la innovación**, tecnologías como el IoT, los gemelos digitales o la inteligencia artificial generan un **pico de expectativas infladas** en el que se cree que resolverán todos los problemas del sector. Pronto sobreviene el **valle de la desilusión**, cuando emergen las barreras reales como son altos costes iniciales sin retorno inmediato, fragmentación de la gobernanza, falta de interoperabilidad, problemas de ciberseguridad y resistencia al cambio.

Algunos proyectos piloto fracasan o no logran escalar. Si la tecnología es realmente valiosa, llega después la **rampa de consolidación**, en la que se ajustan expectativas, se identifican usos prácticos y se desarrollan estándares y modelos de negocio sólidos. Finalmente, en la **meseta de productividad**, la digitalización se adopta de forma generalizada y aporta beneficios claros y medibles. La gestión inteligente de las expectativas, ni cinismo paralizante ni euforia ingenua es, en sí misma, una competencia innovadora en sí misma, y necesaria.

En España, una vez finalizada la fase de implantación digital impulsada por el PERTE, el reto pasa por gestionar las elevadas expectativas que se han ido inflando en los últimos años. En el corto plazo será necesario un periodo de consolidación en el que la sensórica, las plataformas digitales y el resto de las soluciones implementadas demuestren su capacidad para aportar valor en la operación diaria de las infraestructuras. Este proceso permitirá que los diferentes agentes del sector identifiquen, para cada caso de uso, los beneficios reales de estas tecnologías, así como su sostenibilidad técnica, económica y organizativa a largo plazo.

De esta forma, el éxito de la digitalización dependerá en gran medida del papel que asuman los agentes implicados, de quienes se espera una actitud proactiva y colaborativa hacia las soluciones implementadas, ya que estas, por sí solas, no generarán valor añadido. Es previsible que esta etapa vaya acompañada de dificultades asociadas a aspectos transversales como la gestión del dato, la integración entre sistemas, la falta de estandarización, la aplicabilidad de los modelos, la calidad de la información disponible, la ciberseguridad, o los costes de mantenimiento. Superar estos desafíos será determinante para transformar los casos de éxito actuales en soluciones consolidadas y replicables, capaces de generar un cambio real de paradigma en la gestión del ciclo del agua.

4. La gestión del dato.

Si hubiera que señalar un único factor que determina el éxito o el fracaso de la digitalización del agua, sería la gestión del dato. La tecnología analítica avanza con rapidez, pero ningún modelo, por sofisticado que sea, puede superar la **calidad de los datos que lo alimentan**. La gestión efectiva de la información no es un concepto nuevo, desde mediados del siglo XVII el filósofo, historiador, economista y ensayista escocés David Hume pronunció una frase que con el tiempo se convertiría en un clásico, "quien tiene el saber, tiene el poder".

4.1. Arquitectura por capas

Un ciclo integral digital necesita una arquitectura organizada por capas, en la que cada nivel cumple una función específica y se apoya en el anterior.

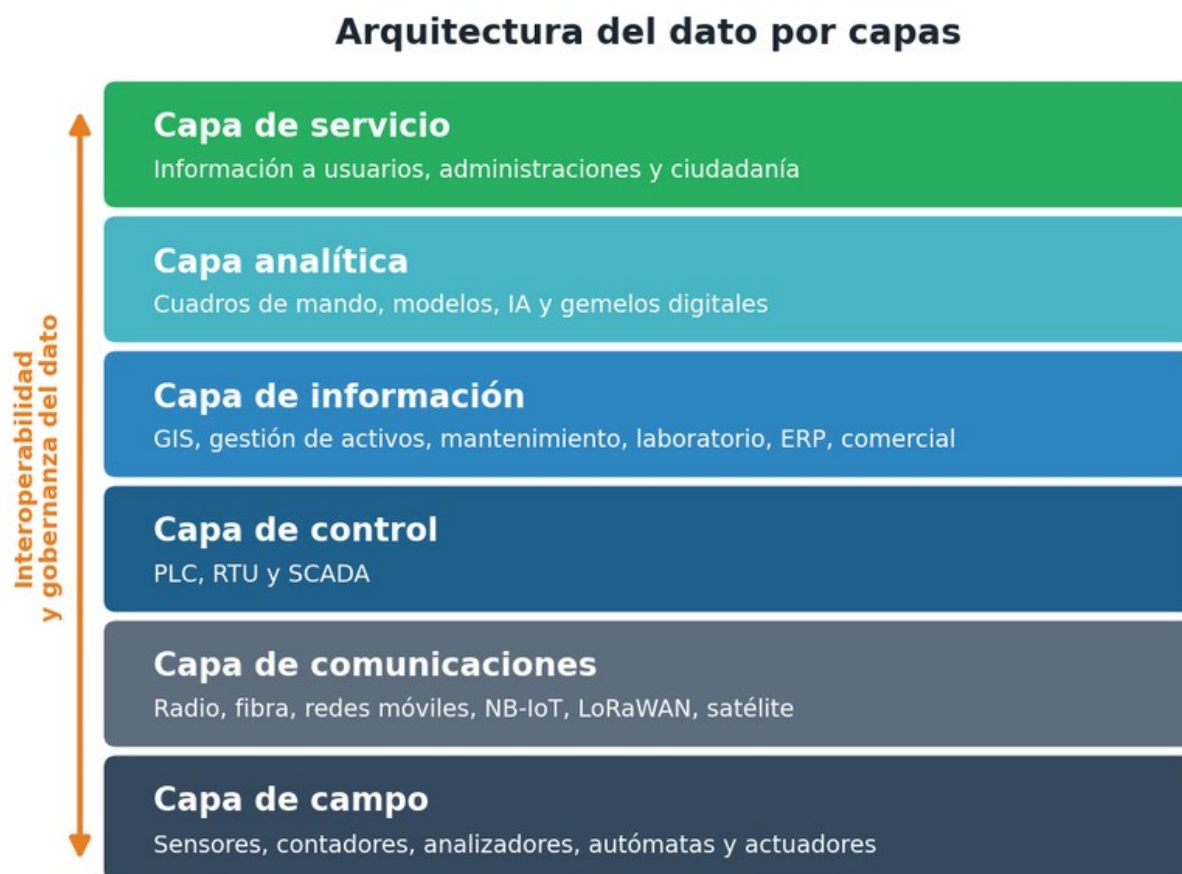


Figura 4 Arquitectura del dato por capas. La interoperabilidad y la gobernanza atraviesan todas las capas.

La **capa de campo** comprende sensores, contadores, analizadores, autómatas y actuadores.

La **capa de comunicaciones** transporta los datos mediante radio, fibra, redes móviles, NB-IoT, LoRaWAN o satélite. La **capa de control** integra PLC, RTU y sistemas SCADA.

La **capa de información** agrupa los sistemas corporativos que gestionan la información como son el GIS, gestión de activos, mantenimiento, laboratorio (LIMS), ERP y sistemas comerciales.

La **capa analítica** contiene los cuadros de mando, los modelos, la inteligencia artificial y los gemelos digitales. Y la **capa de servicio** entrega información a usuarios, administraciones y ciudadanía.

4.2. Interoperabilidad y estándares

La prioridad fundamental de esta arquitectura debe ser la **interoperabilidad**. Los datos han de disponer de identificadores únicos, unidades normalizadas, metadatos, sello temporal y criterios de calidad. El gran riesgo es que cada nueva plataforma se convierta en un nuevo silo tecnológico, incompatible con los sistemas existentes y dependiente de un único proveedor. La falta de estándares comunes en la recopilación y gestión de datos, agravada por la fragmentación del sector entre administraciones locales, autonómicas y estatales, **es una de las barreras más persistentes para la digitalización** en España. La interoperabilidad es la condición que permite que el ciclo integral funcione como un sistema y no como una suma de instalaciones aisladas, y esta idea es fundamental cuando hablamos de digitalizar el sector.

4.3. Gobernanza del dato

La gobernanza del dato debe establecer con claridad quién es el **propietario** de cada serie de datos, quién es responsable de su validación, qué permisos y reglas de modificación existen y en qué condiciones se intercambia la información.

Un aspecto frecuentemente olvidado es la **retención histórica**. En muchas de las jornadas que hemos asistido en los últimos años, cuando se habla de digitalizar el sector se han puesto de manifiesto que algunos sistemas SCADA sobrescriben por defecto los datos al cabo de un año, de modo que una infraestructura aparentemente digitalizada puede carecer de los **históricos** necesarios para analizar tendencias, calibrar modelos o planificar inversiones. Decidir cuánto tiempo se conserva cada variable, y con qué resolución, es una decisión de **gobernanza** tan importante como la elección de los sensores.

4.4. La calidad del dato

Como se ha dicho en puntos anteriores, y es algo que conviene repetirlo porque es contraintuitivo en la era de los algoritmos, es que ningún algoritmo puede compensar una instrumentación mal mantenida. El mantenimiento, también en el ámbito de la digitalización, es siempre el gran olvidado. Los analizadores requieren calibración, limpieza, reposición de consumibles y comparación con resultados de laboratorio. **La calidad de un modelo nunca será superior a la calidad de las medidas que lo alimentan.** Por eso, la innovación más rentable no siempre es la más vistosa, porque gusta mucho ver *dashboard supertecnificados* y “bonitos”, pero el verdadero valor consiste en establecer rutinas de verificación de sensores, protocolos de validación de datos y procedimientos de mantenimiento de la instrumentación, que mantengan la calidad del dato en el futuro de la instalación.

4.5. Ciberseguridad y continuidad operativa

El abastecimiento y el saneamiento son servicios esenciales e infraestructuras críticas. La conexión remota de estaciones de bombeo, válvulas, autómatas y analizadores amplía inevitablemente la superficie de exposición a incidentes informáticos. Un sistema seguro debe incluir segmentación entre las redes corporativas y las de operación, autenticación reforzada, control de privilegios, inventario de activos, actualización de equipos, registro de accesos, copias de seguridad y procedimientos de recuperación.

Un principio fundamental es que la continuidad hidráulica no puede depender por completo de la conectividad. Las instalaciones críticas deben mantener modos locales seguros y enclavamientos físicos. Una orden remota nunca debe poder anular las protecciones por sobrepresión, funcionamiento en seco, nivel mínimo o fallo eléctrico. La ciberseguridad ha de incorporarse desde el diseño y no añadirse a posteriori; de hecho, en el marco del PERTE se considera un proyecto habilitador necesario para sustentar toda la transformación digital del operador.

5. Los famosos Gemelos digitales, ¿qué son y para qué sirven?.

5.1. Definición y consenso

La digitalización y los gemelos digitales (GD) se han convertido en palabras de moda en el sector del agua, adoptadas de otras industrias y llegadas durante los últimos años, a veces sin suficiente consenso ni una comprensión profunda de los desafíos y las necesidades futuras de desarrollo. El término se utiliza con frecuencia de forma imprecisa, confundiendo modelos de diseño con modelos de soporte a la decisión.

El origen del concepto se remonta a comienzos de la década de 2000, formalizándose por Michael Grieves, y no apareció en publicaciones oficiales hasta principios de la década de 2010, cuando se introdujo en la industria manufacturera antes de expandirse a otros sectores como el del agua. Un gemelo digital es un modelo virtual ejecutable de un sistema físico. Más allá de la definición, existe consenso sobre tres rasgos que distinguen un GD de un simple modelo de simulación (Torfs et. al, 2022):

- ✓ Un GD asume inherentemente la existencia de una contraparte física a la que debe estar conectado (un equipo, un proceso o un activo).
- ✓ Un GD debe mantener una conexión de datos, preferiblemente bidireccional, con la entidad real; la conexión de lo real a lo virtual debe estar automatizada, mientras que la de lo virtual a lo real puede ser automática (vía SCADA) o manual.
- ✓ Los dos gemelos deben evolucionar juntos. El GD ha de actualizar o ajustar dinámicamente sus modelos para mantener una descripción precisa de la entidad real a medida que esta cambia con el tiempo, convirtiéndose en un repositorio continuo de conocimiento actualizado.

Estos rasgos han sido recogidos y formalizados por la normalización internacional (ISO 23247), que ofrece un marco para implementar sistemas de gemelos digitales en distintas industrias, definiendo sus tipos, sus procesos de ciclo de vida y el papel de los actores implicados. Queda aún por consensuar el concepto de "conectividad en línea", pues, según el proceso, el "tiempo real" puede significar un minuto, una hora, un día o una semana.

5.2. El gemelo físico, el gemelo fenomenológico y la interpretabilidad.

En el caso de los sistemas de agua, el gemelo digital es la réplica de un mundo real cuyo comportamiento fenomenológico está gobernado por las leyes de la física, la química y/o la biología. Ese comportamiento no puede replicarse íntegramente mediante análisis estadísticos o relacionales, lo que tiene implicaciones profundas sobre el tipo de modelos que conviene emplear (Giustolisi, 2024). Las actividades técnicas necesitan comprensión física, es decir, modelos interpretables que permitan entender por qué se producen las predicciones y las soluciones óptimas, para sustentar decisiones de eficiencia y, sobre todo, para diseñar y planificar a distintos horizontes temporales.

Espectro de modelos del gemelo digital

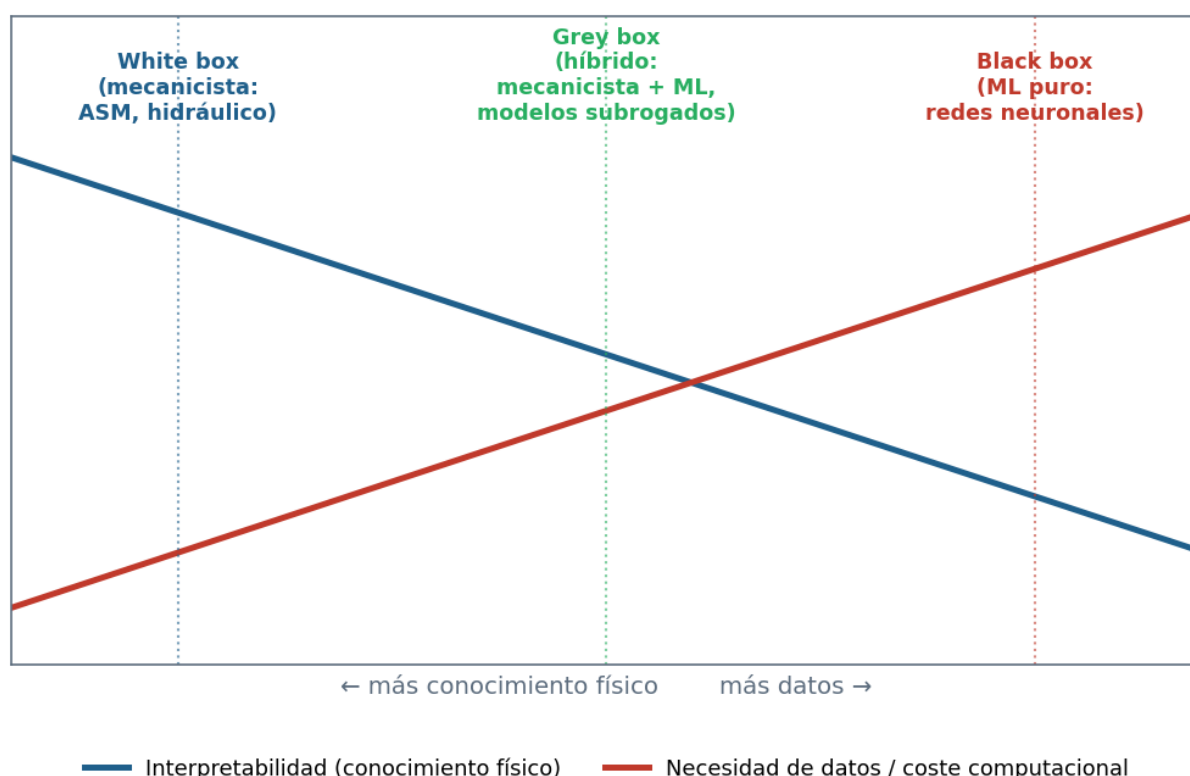


Figura 5 Espectro de modelos. Los modelos mecanicistas (white box) ofrecen interpretabilidad a costa de recursos; los modelos de datos (black box) son de bajo coste pero escasa interpretabilidad; los híbridos (grey box) combinan ambos.

Existe un compromiso fundamental entre interpretabilidad y coste. Los modelos físicamente fundamentados, denominados *cajas blancas* (white box), ofrecen una interpretabilidad valiosa a cambio de un alto coste en recursos y conocimiento. Los modelos basados en aprendizaje automático, o *cajas negras* (black box), son de bajo coste y solo requieren datos de entrada y salida del sistema, pero adolecen de escasa interpretabilidad. Entre ambos extremos se sitúan los enfoques híbridos o *cajas grises* (grey box), que combinan la estructura mecanicista con técnicas basadas en datos.

En el tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, el uso de gemelos digitales híbridos combina la robustez y el poder predictivo de los modelos mecanicistas de fangos activados (familia ASM) junto con técnicas de *machine learning*, que evitan algunos de sus problemas habituales, como la velocidad de respuesta, la pérdida de precisión por ajustes de parámetros, así como la necesidad de calibraciones sucesivas de constantes difíciles de determinar fuera del laboratorio.

5.3. ¿Es un BIM o un GIS un gemelo digital?.

Esta parte del artículo daría para uno propio, ya que el BIM (Building Information Model) debe entenderse como una metodología de trabajo que, como su nombre indica, encierra en sí misma un modelo. Sin embargo, históricamente se ha ido segregando por niveles de detalle o LOD (Level of Development), una escala estandarizada, dentro de la metodología BIM, que define el grado de detalle y fiabilidad de los elementos de un modelo digital.

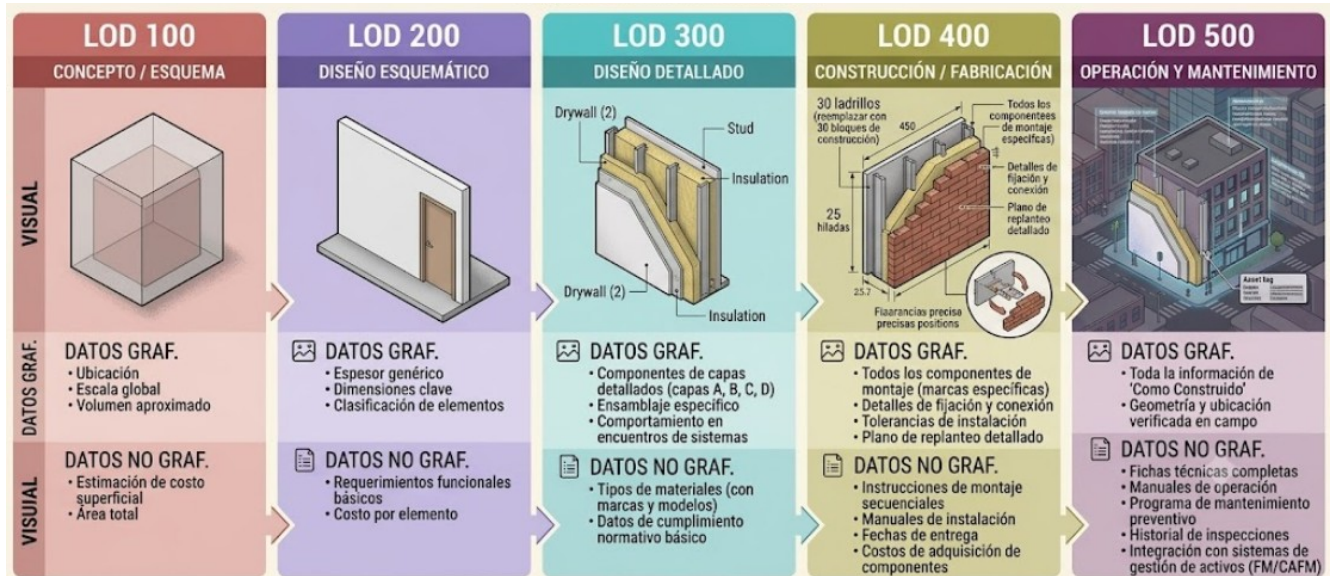


Figura 6 Organización del modelado (LOD)

En este apartado podríamos citar, de manera destacada el Manual del Sistema de Clasificación BIM de DAQUAS - Asociación Española del Agua Urbana, un trabajo fruto del consenso, de enfoque abierto, cuyo principal objetivo es facilitar la digitalización a todos los actores que intervienen en el sector del ciclo integral del agua.

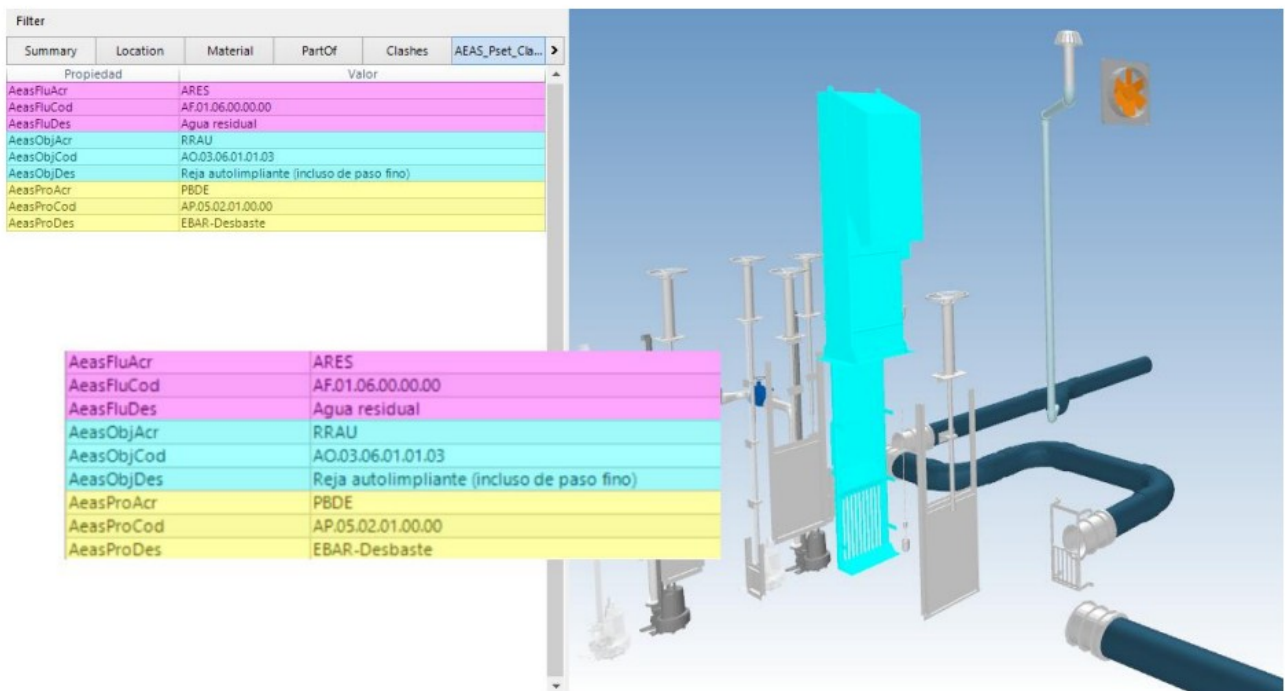


Figura 7 Clasificación de elementos por medio de IfcPropertySet e IfcProperty. FUENTE. Manual del Sistema Clasificación BIM.

En un sentido amplio, el gemelo digital es una réplica digital de activos físicos (Pedersen et al., 2021). Surge entonces la pregunta de si un modelo BIM (Building Information Model) o un modelo basado en GIS (Sistema de Información Geográfica) pueden considerarse gemelos digitales. El matiz fundamental es la distinción entre modelo estático y modelo dinámico.

Un modelo BIM tradicional es una representación digital de un activo físico que se usa principalmente para su diseño, construcción y gestión, pero que no necesariamente intercambia datos en tiempo real ni evoluciona con la entidad real. Un BIM o un GIS son cimientos imprescindibles del gemelo digital, ya que aportan la geometría, la topología y los atributos de los activos; sin embargo, sin un flujo de datos vivo y una capacidad de actualización dinámica, no constituyen por sí solos un gemelo digital en sentido estricto.

5.4. Tipologías por escala y alcance.

Los gemelos digitales se desarrollan para objetivos y alcances muy distintos, y la elección de su estructura depende de la aplicación concreta. En el ámbito de la depuración de aguas residuales pueden distinguirse dos grandes enfoques.

El **gemelo digital integral de la EDAR** abarca toda la planta, desde la entrada del agua residual hasta la descarga del efluente tratado. Permite una visión holística que facilita la optimización global, simula el impacto de cambios en una unidad sobre el resto de la planta y mejora la gestión energética. A cambio, exige mayor capacidad computacional, más datos en tiempo real y procesos de calibración y validación más complejos.

Los **gemelos digitales por unidades de proceso** asignan a cada proceso unitario (pretratamiento, tratamiento biológico, clarificación, desinfección, digestión anaerobia, etc.) su propio gemelo independiente, que puede integrarse después con otros. Esta opción ofrece mayor flexibilidad, facilita la calibración individual y reduce la complejidad del desarrollo, pero corre el riesgo de perder interacciones clave entre procesos si la integración no se gestiona bien.

En la práctica, el enfoque híbrido, desarrollar gemelos por unidades de proceso o capas, e integrarlos progresivamente en un modelo global, suele ser la vía más viable. La regla general es sencilla, para la optimización operativa global y la predicción a largo plazo conviene el gemelo integral; para mejorar procesos específicos o resolver problemas localizados, conviene el gemelo por unidades. A largo plazo, se tenderá a desarrollar gemelos digitales urbanos multiobjetivo con un elevado potencial transformador, pero actualmente se encuentran en una fase temprana e inmadura, debido a las siguientes limitaciones: estandarización e interoperabilidad de datos, sistemas robustos de validación y recalibración continua, marcos de gobernanza claros y colaborativos, capacidades organizativas y talento especializado e integración real de la dimensión social y participativa (Gamze, A., 2026).

5.5. Funcionalidades del gemelo digital.

Un gemelo digital aporta valor al hacer que los datos sean relevantes en el tiempo y procesables de una manera que el análisis tradicional no permite. A partir de los datos del sistema físico, respalda una mejor toma de decisiones y crea oportunidades de retroalimentación positiva sobre el propio sistema. Entre sus funcionalidades, aunque no todas serán necesarias en cada caso, destacan:

- soporte a la toma de decisiones operativas
- optimización multiobjetivo en línea (nutrientes, energía, huella de carbono),
- mantenimiento predictivo y el análisis de fallos,
- gestión de activos,
- capacitación
- entrenamiento de operadores mediante simulación,
- planificación de inversiones mediante análisis de escenarios
- apoyo a las políticas de gobernanza.

Se podría hablar de muchos ejemplos de éxito (Valverde-Perez, 2021), pero un caso especialmente innovador es la epidemiología basada en aguas residuales, que utiliza datos del sistema de alcantarillado para detectar patrones de enfermedades en la población (Poch et al., 2020), una aplicación cuya utilidad como sistema de alerta temprana quedó demostrada durante la pandemia de COVID-19.

5.6. El gemelo digital como núcleo del sistema de soporte a la decisión

La culminación del gemelo digital es su integración en un **sistema de soporte a la decisión** (DSS) a través de plataformas inteligentes que combinan el GD como base de cálculo con datos en tiempo real, simulaciones y algoritmos avanzados, así como con fuentes de datos externas que lo enriquecen.

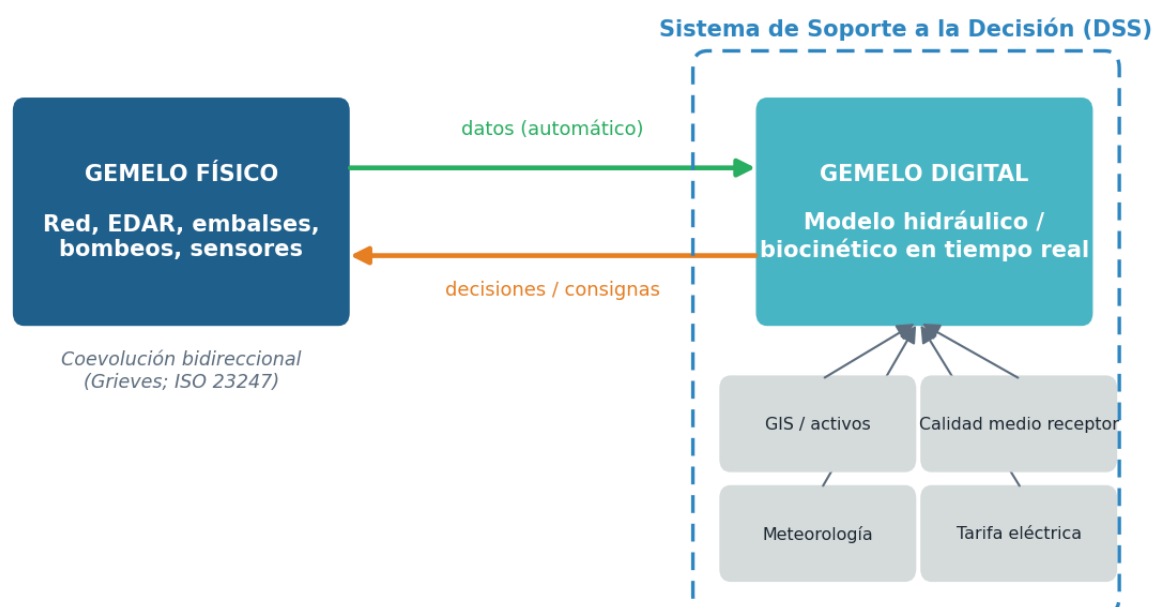


Figura 8. Esquema del gemelo digital y su integración en un DSS. El intercambio bidireccional con el sistema físico se enriquece con fuentes externas (meteorología, tarifa eléctrica, GIS, calidad del medio receptor).

Las nuevas fuentes de información como son el pronóstico meteorológico, la tarificación energética, el estado ecológico de las aguas receptoras, la calidad del aire, permiten optimizar la gestión desde una perspectiva holística en lugar de un enfoque de dominio específico (Karmous-Edwards et al., 2019). Esta manera de trabajar ofrece un gran potencial de ahorro económico (por ejemplo, optimización energética en línea), una protección más eficaz del medio ambiente (control predictivo basado en modelos para la eliminación de nutrientes) y mayores beneficios sociales, como una mejor gestión del agua pluvial para minimizar el riesgo de inundaciones urbanas (Stentoft, 2020).

Las plataformas DSS aplicadas a las **redes de abastecimiento** son las que se encuentran en un estado más avanzado de implementación. Se basan en modelos hidráulicos en tiempo real de toda la red, integrando datos de SCADA, GIS, sensores IoT y sistemas de gestión del mantenimiento (GMAO), y permiten simular escenarios reales e hipotéticos. Con la gestión de la telelectura ya consolidada, actualmente se centran en la reducción de fugas y pérdidas y, de forma creciente, en la incorporación de modelos de calidad del agua para optimizar la cloración y controlar la presencia de subproductos de la desinfección.

Cabe destacar los avances en materia de gemelos digitales que ha experimentado el sector del saneamiento mediante la implementación de plataformas comerciales, basadas en un modelo hidrológico-hidráulico dual (1D/2D) capaz de simular la inundabilidad, la escorrentía superficial y el funcionamiento del sistema de drenaje. Conectado a modelos de predicción meteorológica y tecnología radar, incorpora capacidades de alerta temprana que permiten anticipar la respuesta del sistema frente a episodios de lluvia y predecir riesgos de inundación, sobrecargas en colectores, afecciones en estaciones de bombeo, activación de aliviros, e incluso el impacto de los vertidos sobre el medio receptor.

En la **depuración**, la mayoría de las soluciones actuales se concentran en el soporte de decisiones operativas y la optimización en línea mediante control avanzado basado en señales provenientes, generalmente, de un número bastante limitado de sondas en planta. Aunque la ejecución del PERTE ha facilitado la integración de soluciones digitales de diferente tipología, las implementaciones documentadas en este campo son aún escasas. Esto es debido a una serie de limitaciones técnicas que están retrasando estas integraciones, como son: la complejidad de los procesos físico-químicos y biológicos, su recalibración dinámica periódica, la sensorización limitada en las EDAR, la automatización de datos de proceso que provienen de laboratorio, las singularidades de las instalaciones y sus sistemas de control automático, así como el tiempo de respuesta del sistema integral EDAR en tiempo casi real (near real-time).

Así, la transición de los modelos de proceso convencionales, integrados en software como BioWin, WEST o SUMO y utilizados tradicionalmente fuera de línea para el diseño y optimización, hacia gemelos digitales conectados en tiempo real exige cambios profundos a varios niveles buscando combinar la capacidad predictiva de los modelos mecanicistas con técnicas de datos, automatizar la adquisición y validación de las señales y, sobre todo, integrar el gemelo en un sistema de soporte a la decisión capaz de cerrar el bucle con la operación. Actualmente, la implementación de los gemelos digitales en EDAR encuentran su equilibrio en los modelos digitales híbridos, mencionados anteriormente, los cuales combinan lo mejor de los dos mundos, el mecanicista (robustez de las ecuaciones y experiencia en EDAR) y el basado en datos (algoritmos con nuevas funcionalidades).

UN GEMELO DIGITAL DISPONE DE UN MODELO MATEMÁTICO EN SU NÚCLEO

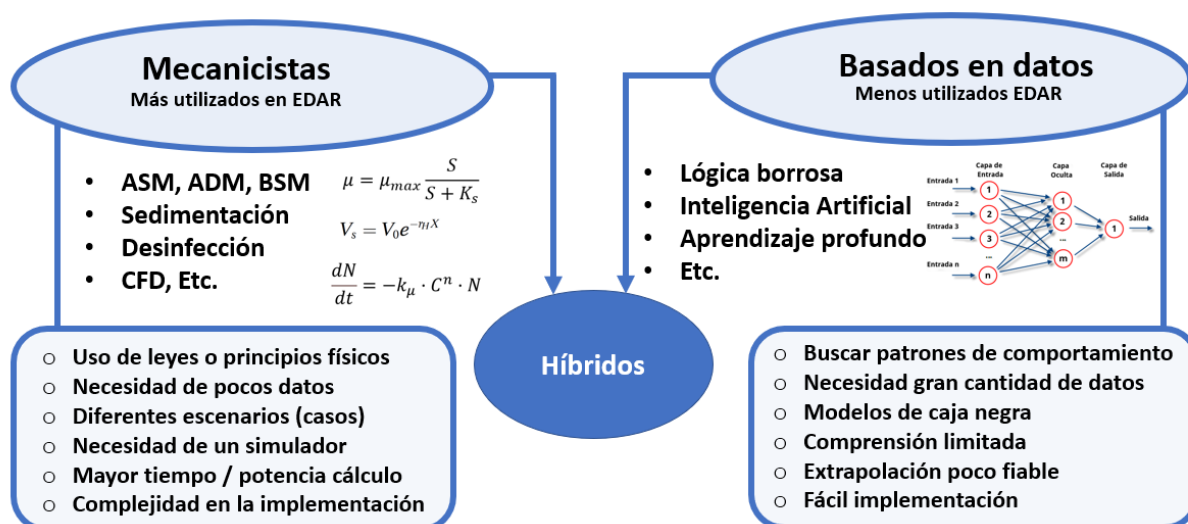


Figura 9. GD y la modelización matemática (adaptado de Torfs et al., 2022)

6. Herramientas innovadoras.

La transformación digital del agua se apoya en un conjunto de tecnologías que evolucionan con rapidez y que, combinadas, multiplican su valor.

Sensórica IoT y conectividad. La medición en tiempo real depende de sensores de caudal, presión, nivel y calidad, así como de contadores inteligentes. La innovación más relevante en este ámbito es la conectividad de bajo consumo y largo alcance, como son tecnologías como LoRaWAN o NB-IoT permiten interconectar miles de dispositivos con bajo consumo energético y amplia cobertura, lo que resulta especialmente valioso en redes extensas y dispersas. La elección de la frecuencia de transmisión es uno de los parámetros fundamentales de decisión, ya que una mayor frecuencia incrementa el volumen de datos, la necesidad de almacenamiento y el consumo de batería de los contadores, por lo que debe ponderarse frente al valor real de la información obtenida.

Sensores virtuales o soft sensors. Un sensor virtual no es un equipo instalado físicamente, sino un modelo matemático o algoritmo que estima una variable difícil, costosa o imposible de medir de forma continua a partir de otras variables que sí están disponibles. Por ejemplo, en una EDAR puede estimarse la DBO_5 o la carga contaminante utilizando datos continuos de caudal, turbidez, conductividad, temperatura u oxígeno disuelto, complementados con análisis periódicos de laboratorio. En una red de abastecimiento, un modelo hidráulico puede estimar la presión en puntos no instrumentados a partir de los caudales de entrada, los niveles de los depósitos, el estado de las bombas y las presiones medidas en otros puntos. También pueden utilizarse para anticipar la formación de subproductos de desinfección, detectar fugas o estimar la humedad del suelo en zonas sin sondas. Estas herramientas reducen la necesidad de instalar equipos en todos los puntos y proporcionan información continua, aunque sus resultados son estimaciones y deben calibrarse y validarse periódicamente mediante mediciones reales.

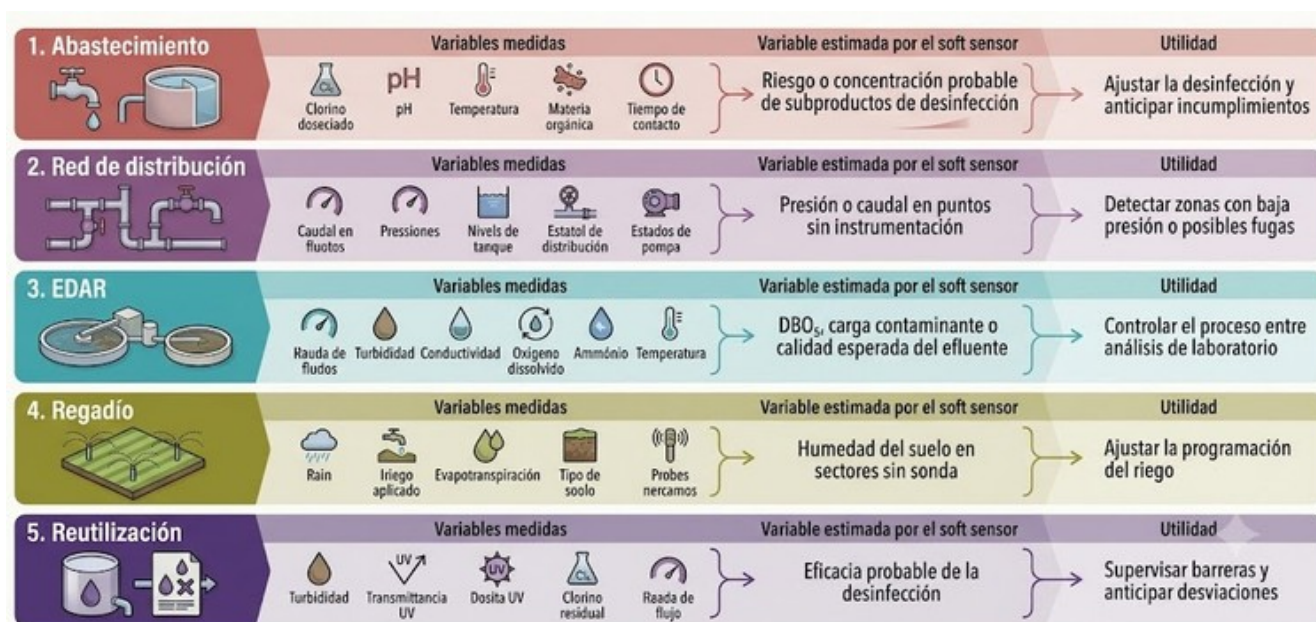


Figura 10 Soft sensors en la gestión del agua.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático. La IA atraviesa todas las capas analíticas, desde la detección temprana de fugas e infiltraciones, optimización de bombeos, predicción de demanda, mantenimiento predictivo y análisis de calidad. Su mayor potencial se despliega cuando se combina con el conocimiento físico de los procesos en lugar de sustituirlo.

Modelos subrogados y técnicas híbridas. Una innovación destacada consiste en entrenar redes neuronales con datos artificiales generados por modelos mecanicistas en escenarios simulados (modelos subrogados). Esta técnica ha permitido calcular en segundos el comportamiento de modelos de alta precisión y elevado coste computacional, como los de dinámica de fluidos computacional (CFD) (Trifi et al., 2026). Otra línea prometedora incorpora una ecuación diferencial neuronal dentro de un modelo mecanicista, capaz de capturar la dinámica que el componente mecanicista no recoge, mejorando la capacidad predictiva y permitiendo la extrapolación a condiciones poco frecuentes (Quaghebeur et al., 2022).

Teledetección, drones, robótica y visión artificial. La combinación de teledetección satelital y aérea, drones, plataformas robotizadas y técnicas de visión artificial permite ampliar notablemente la capacidad de observación y diagnóstico de las infraestructuras hidráulicas. Estas soluciones se emplean para monitorizar embalses, ríos y zonas inundables; inspeccionar presas, canales, tuberías y redes de abastecimiento y saneamiento en lugares de difícil acceso; y detectar fisuras, deformaciones, filtraciones, obstrucciones, vertidos o conexiones indebidas. En colectores y galerías, los drones autónomos y robots de inspección reducen la necesidad de entrada de operarios en espacios confinados y permiten obtener imágenes de alta resolución, reconstrucciones tridimensionales y nubes de puntos.

A su vez, los algoritmos de inteligencia artificial pueden analizar automáticamente las imágenes procedentes de inspecciones CCTV o robotizadas, identificar y clasificar defectos, evaluar el estado de los tramos y generar información estructurada para priorizar actuaciones de limpieza, mantenimiento y rehabilitación. Las imágenes térmicas, multiespectrales y radar aportan, además, información sobre humedad, pérdidas, calidad del agua, estrés hídrico y evolución de la vegetación, mientras que la teledetección satelital proporciona una escala territorial, una cobertura periódica y una capacidad de seguimiento difícilmente alcanzables mediante instrumentación exclusivamente terrestre.

GIS, BIM y la integración de sistemas. Como se ha señalado, los entornos GIS y BIM proporcionan la base espacial, geométrica y patrimonial necesaria para representar las infraestructuras y organizar la información asociada a cada activo. Sin embargo, su verdadero valor aparece cuando se integran con los sistemas de operación y gestión, como SCADA, GMAO, plataformas de telecontrol, sistemas comerciales, bases de datos de laboratorio y herramientas de planificación. Esta interoperabilidad permite relacionar la ubicación y características de los activos con su estado operativo, historial de mantenimiento, consumos, incidencias y costes, evitando la creación de nuevos silos de información. De este modo, el conjunto deja de funcionar como una suma de aplicaciones independientes y se convierte en una plataforma coherente de gestión, capaz de alimentar modelos, gemelos digitales y sistemas de soporte a la decisión.

El balance hídrico y la sectorización como caso de uso central. Entre todas las aplicaciones, la reducción del agua no registrada (ANR) es la que ofrece resultados más inmediatos y, por ello, la que mejor justifica la inversión digital. Su punto de partida es la elaboración de un balance hídrico coherente, en el que el volumen de entrada a un sector debe igualar la suma del consumo autorizado, las pérdidas aparentes (errores de medida, fraudes, consumos no facturados), las pérdidas reales (fugas físicas) y la variación del agua almacenada. Es un error frecuente identificar el agua no registrada con la fuga física, si bien es cierto, que buena parte puede deberse a errores de medición, desfases temporales o deficiencias en las bases de datos comerciales. Para reducir esa incertidumbre es necesario sectorizar la red en áreas hidráulicamente controladas (DMA, *District Metered Areas*), instalando caudalímetros y sensores de presión en sus entradas. La combinación de la sectorización con el análisis del caudal mínimo nocturno, la gestión de presiones y los modelos hidráulicos en tiempo real permite localizar las fugas con rapidez y priorizar las intervenciones, transformando una gestión reactiva en una gestión predictiva del activo. Esta cadena, medir, sectorizar, modelar, decidir, resume en la práctica todo el discurso de la digitalización.

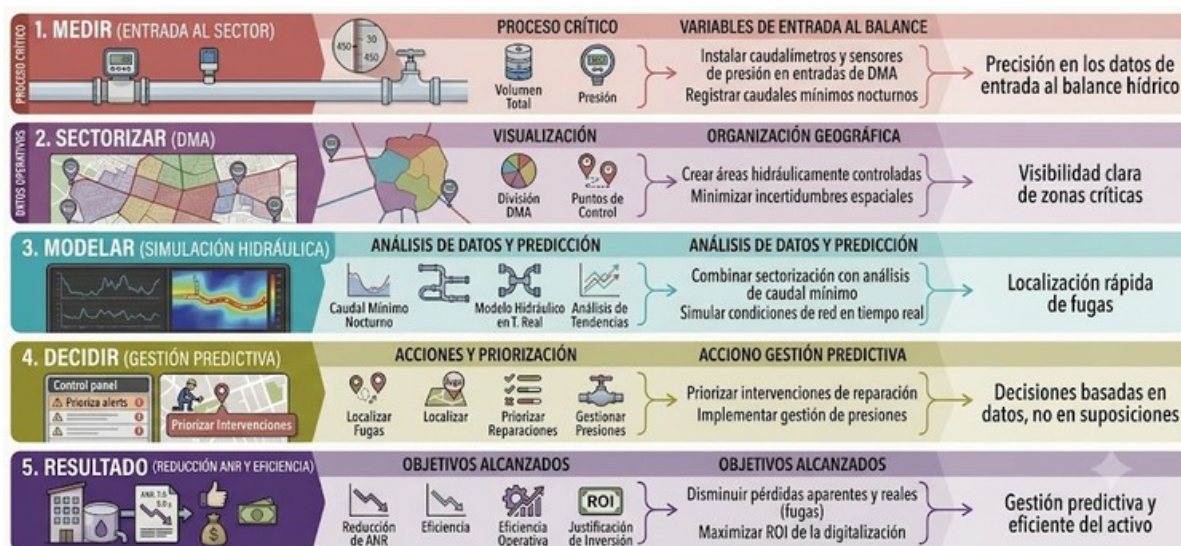


Figura 11 Cadena de procedimientos en la digitalización.

7. El PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua.

El Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Digitalización del Ciclo del Agua, aprobado en marzo de 2022, ha actuado como el gran acelerador de la transición digital del sector hídrico en España. Sus líneas de actuación abarcan:

- mejora de la gobernanza
- digitalización de las administraciones hidráulicas
- ayudas a los usuarios del agua y el desarrollo de capacidades digitales.

Entre sus objetivos figuran la optimización del uso del agua, la reducción de pérdidas mediante detección temprana de fugas, la resiliencia climática frente a sequías e inundaciones, y la transparencia y el acceso a los datos para una mejor gobernanza.

El PERTE se inició en un momento donde se ha realizado una intensa labor normativa por parte de las administraciones europea y nacional. El Real Decreto 3/2023 refuerza el enfoque preventivo y basado en el riesgo en el suministro de agua de consumo y establece obligaciones de evaluación de fugas estructurales para sistemas que suministran más de 100 m³ diarios, con comunicación periódica a las administraciones. El Real Decreto 1085/2024 consolida un enfoque basado en la gestión del riesgo y en la aplicación de barreras para la reutilización del agua regenerada.

A escala europea, las directivas marco del agua (WFD) y de agua potable (DWD) exigen monitorización en tiempo real y una gestión eficiente del recurso. La digitalización es, en buena medida, la respuesta técnica a estas nuevas obligaciones.

7.1. Convocatorias y cifras movilizadas

El PERTE se ha desplegado a través de convocatorias competitivas dirigidas a distintos beneficiarios.

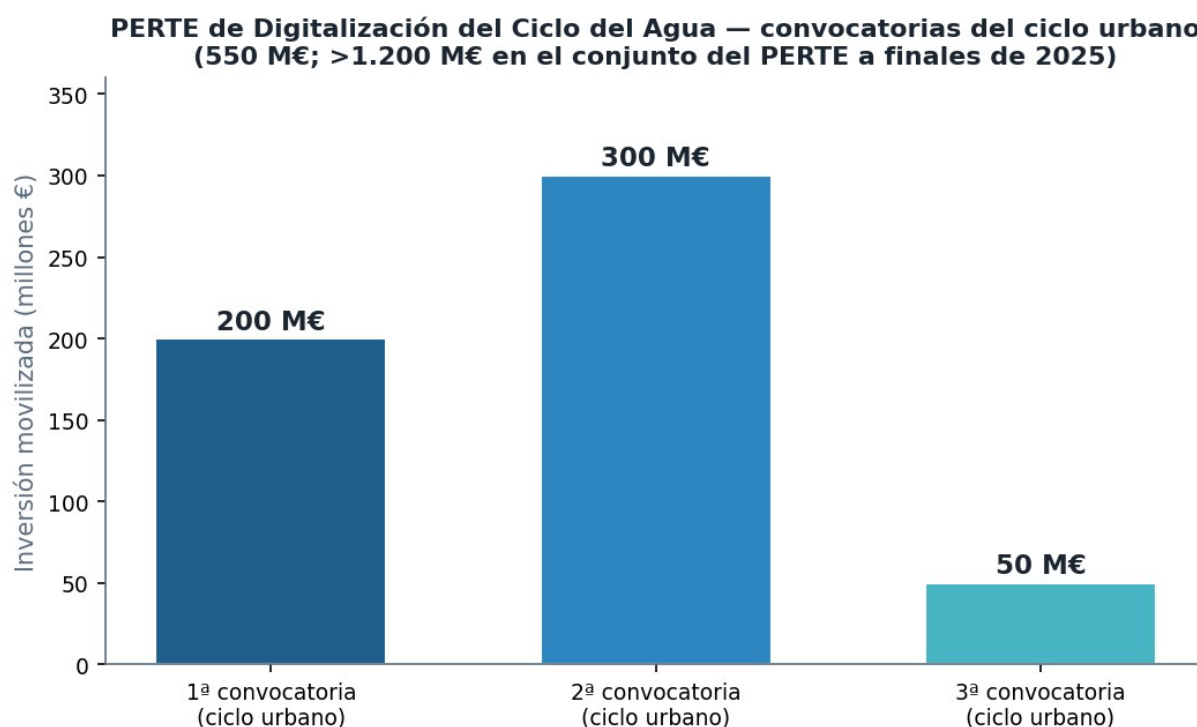


Figura 12 Convocatorias del ciclo urbano del PERTE. En el conjunto del programa se han movilizado más de 1.200 millones de euros a finales de 2025.

En el ciclo urbano, las tres convocatorias competitivas han movilizado 550 millones de euros: 200 millones en la primera, 300 millones en la segunda y 50 millones en la tercera.

La primera convocatoria del ciclo urbano benefició a 1.676 municipios y a casi 15 millones de habitantes; la segunda alcanzó 1.155 municipios y 13,17 millones de habitantes, de los cuales aproximadamente 840 tenían menos de 5.000 habitantes. Existió, además, una línea específica para comunidades de usuarios de agua de regadío. A finales de 2025, el conjunto del PERTE había movilizado más de 1.200 millones de euros entre operadores urbanos, regadío, comunidades autónomas, organismos de cuenca y la Dirección General del Agua. Adicionalmente, se distribuyeron 200 millones a las comunidades autónomas, de los cuales 120 millones se orientaron a la digitalización de administraciones autonómicas y locales, especialmente en municipios de menos de 20.000 habitantes (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024).

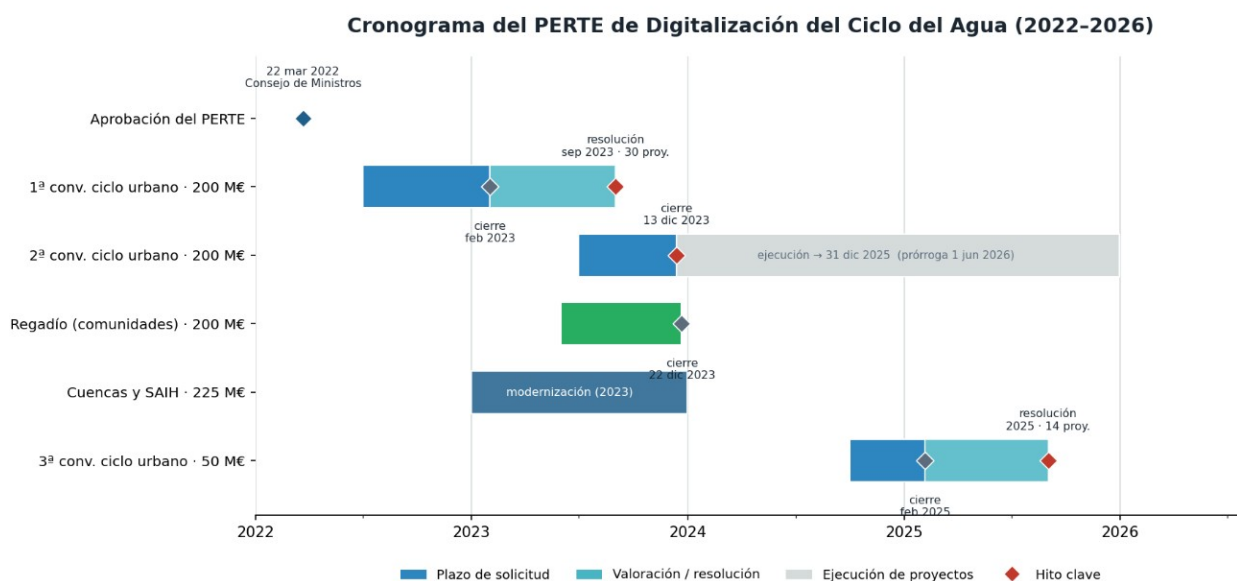


Figura 13 Cronograma del PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua (2022-2026).

El **PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua** se aprobó en el Consejo de Ministros del **22 de marzo de 2022**, con una previsión inicial de movilizar 3.060 millones de euros (ampliados hasta unos 3.485 millones tras la adenda de 2023). Su despliegue ha sido una sucesión de convocatorias escalonadas dirigidas a beneficiarios distintos, operadores urbanos, comunidades de regantes y organismos de cuenca, lo que explica que los plazos se solapen en el tiempo.

El **ciclo urbano** se vertebraba el programa a través de tres convocatorias competitivas.

- La **primera** (200 M€) se publicó en 2022, cerró el plazo de solicitudes en febrero de 2023 y se resolvió de forma definitiva en septiembre de 2023, con 30 proyectos que alcanzaron a 1.676 municipios de 16 comunidades autónomas y a casi 15 millones de habitantes.
- La **segunda** (200 M€) se abrió en 2023 y cerró el 13 de diciembre de 2023; su rasgo característico es el largo periodo de ejecución, fijado hasta el 31 de diciembre de 2025 con posibilidad de prórroga hasta el 1 de junio de 2026.
- La **tercera** (50 M€), de menor cuantía, cerró su plazo a comienzos de febrero de 2025 y se resolvió ese mismo año con 14 proyectos.

En paralelo, el PERTE reservó líneas específicas para otros dominios del ciclo integral, como fueron **200 M€ para la digitalización del regadío** (comunidades de usuarios, con convocatoria cerrada el 22 de diciembre de 2023) y **225 M€ para modernizar los organismos de cuenca y los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH)** a lo largo de 2023.

La lectura de conjunto es que **2023 fue el año de mayor actividad** y se concentraron los cierres de la primera, segunda y la línea de regadío, además de la inversión en cuencas, mientras que **2024-2025 marcaron la fase de ejecución** del grueso de los proyectos y el cierre de la tercera convocatoria. El verdadero balance del programa, sin embargo, se medirá a partir de 2026, cuando finalicen las ejecuciones y puedan evaluarse los resultados sobre reducción de pérdidas, eficiencia y transparencia.

El verdadero resultado del programa, sin embargo, no se determinará por el número de dispositivos adquiridos, sino por su capacidad para mejorar el balance hídrico, reducir pérdidas, anticipar averías, controlar los desbordamientos, optimizar el tratamiento y aumentar la transparencia.

7.2. La cuestión supramunicipal

Uno de los principales riesgos del PERTE es que la digitalización amplíe la brecha entre los grandes operadores y los municipios pequeños, que suelen disponer de menos personal, redes peor documentadas y menor capacidad para mantener plataformas y sensores. El programa ha favorecido por ello las agrupaciones y los proyectos supramunicipales. La escala supramunicipal permite compartir centro de control, personal especializado, comunicaciones, mantenimiento y ciberseguridad. Las experiencias de diputaciones y consorcios muestran que el telecontrol resulta especialmente valioso en núcleos dispersos, donde una simple medida del nivel del depósito evita desplazamientos y facilita la detección de incidencias.

7.3. Barreras de adopción

A pesar del impulso del PERTE y de los fondos europeos, persisten barreras significativas. La **fragmentación del sector** y la complejidad de la gobernanza dificultan la coordinación y la estandarización. Las **limitaciones de financiación** afectan especialmente a los municipios pequeños y generan dudas sobre la rentabilidad a largo plazo de inversiones con altos costes iniciales. La **resistencia al cambio** y la brecha digital se manifiestan en culturas organizativas tradicionales y en la falta de formación del personal. Los **desafíos tecnológicos y de interoperabilidad** derivan de infraestructuras antiguas y de la incompatibilidad entre plataformas de distintos proveedores. La **seguridad y protección de datos** plantea riesgos de ciberataques a infraestructuras críticas. Y la **adaptación a eventos climáticos extremos** complica la planificación y la priorización de inversiones. Superar estas barreras exige más colaboración entre administraciones, empresas y centros de innovación, y más inversión en formación, estándares y ciberseguridad.



Figura 14 Barreras en la gestión digital del agua.

8. Casos de estudio reales.

La mejor forma de contrastar las expectativas con la realidad es analizar implementaciones concretas y documentadas; por ello, se han seleccionado diversos casos de éxito representativos.

8.1. Gemelos digitales en el abastecimiento de Barcelona

El proyecto *Lab Digital Twins* de Cetaqua, desarrollado por Cetaqua sobre la red de agua potable de Aigües de Barcelona, constituye uno de los casos españoles mejor documentados (Baena-Miret et al., 2024). Desarrolló dos prototipos de gemelo digital con objetivos complementarios.

El primero, orientado a la gestión de activos, combina datos en tiempo casi real con modelos estadísticos y alcanza una tasa de acierto del 70 % en la predicción de fallos de estaciones de bombeo con hasta 137 días de antelación, lo que transforma el mantenimiento correctivo en mantenimiento predictivo.

El segundo, centrado en la calidad del agua, emplea aprendizaje automático para predecir con precisión los niveles de trihalometanos, subproductos de la desinfección, en puntos clave de la red de distribución, lo que permite estrategias proactivas de gestión de la calidad y el cumplimiento de estándares sanitarios exigentes. El caso ilustra tanto el valor operativo de los gemelos digitales como el hecho de que su utilidad real se mide en indicadores concretos (días de anticipación, tasa de acierto, cumplimiento normativo) y no en la mera existencia de la plataforma.

8.2. SWIM: gemelos digitales con LoRaWAN e IA para redes de distribución

El sistema SWIM (*Smart Water Interaction & Monitoring*), desarrollado en la Universidad de Palermo, ejemplifica la convergencia de varias tecnologías innovadoras en una arquitectura coherente (Res-tuccia et al., 2025). SWIM integra gemelos digitales, herramientas de simulación consolidadas como EPANET y WNTR, y aprendizaje automático, sobre una red IoT basada en LoRaWAN que interconecta contadores y pasarelas con comunicación de bajo consumo. La plataforma Eclipse Ditto abstrae los dispositivos físicos en representaciones digitales, y el sistema ofrece analítica predictiva, detección de anomalías y control en tiempo real. Empleando redes neuronales, SWIM logra predicciones hidráulicas de alta precisión con un mínimo de datos de entrada.

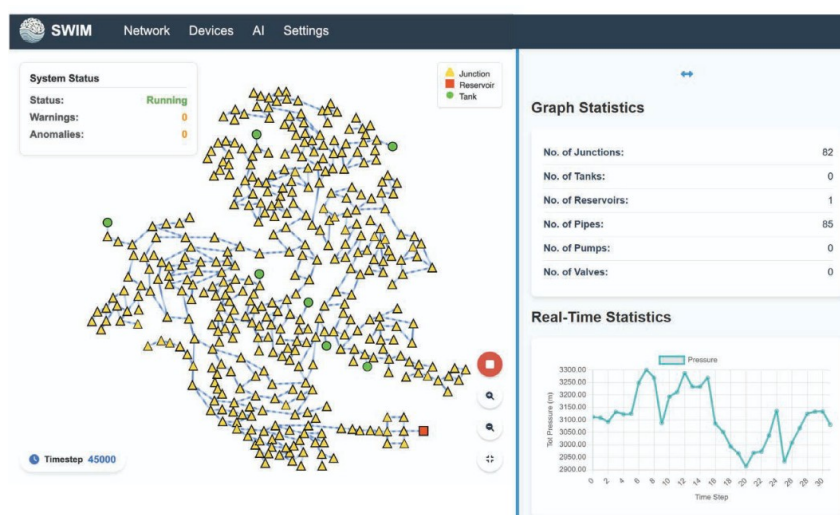


Figura 15 Ejemplo de SWIM display

El caso se alinea explícitamente con los principios de la Industria 5.0 y de la filosofía *Green-IoT*, y demuestra cómo la combinación de conectividad de bajo consumo, simulación hidráulica e inteligencia artificial puede ofrecer soluciones escalables y eficientes.

8.3. Gemelo Digital de alta precisión aplicado a EDAR

La solución desarrollada por la **Universitat Jaume I (UJI)** en colaboración con **HYDRENS** y **FACSA** propone un nuevo enfoque para acelerar el cálculo de modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) aplicados a reactores de fangos activos mediante técnicas de Inteligencia Artificial (Trifi et al., 2026). El objetivo es preservar la información hidrodinámica tridimensional y a escala real proporcionada por los modelos CFD, permitiendo su utilización en aplicaciones operativas y de apoyo a la toma de decisiones en tiempo real, algo que hasta ahora resultaba inviable debido a sus elevados tiempos de cálculo.

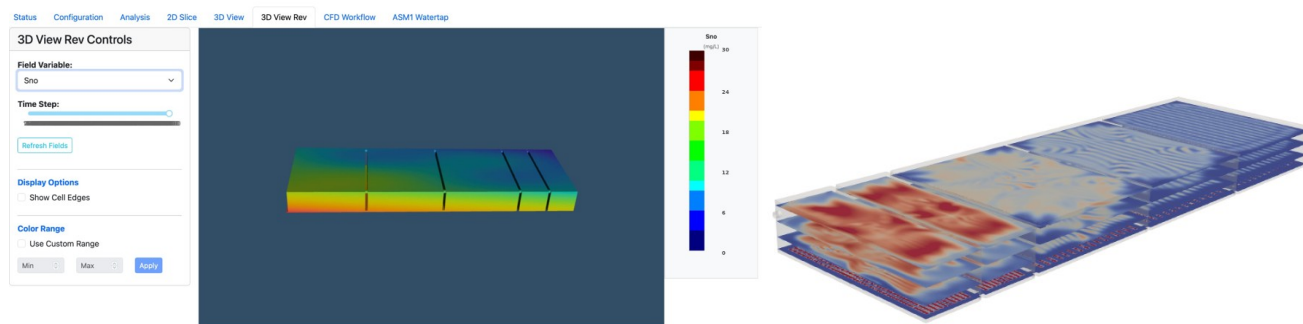


Figura 16 Vista de la plataforma con el modelo CFD

La solución digital consiste en el desarrollo de un modelo hidrodinámico sustituto (“surrogate model”) entrenado mediante IA que reproduce los procesos de nitrificación-desnitrificación a partir de modelos tipo ASM (Activated Sludge Model). El modelo recibe como input datos en tiempo real provenientes de las sondas de calidad a la entrada (Caudal, DQO, DBO, N-Amónico) y proporciona la distribución de las especies químicas de interés en todo el tanque mediante *soft sensors*, que a la vez con comparados con las sondas de calidad a la salida. Esta solución con capacidad predictiva ha sido implementada en dos EDAR de 75.000 y 300.000 habitantes equivalentes, respectivamente.

8.4. La Confederación Hidrográfica del Guadiana y su integración en alta

En el ámbito de la gestión del recurso en alta, la experiencia de la Confederación Hidrográfica del Guadiana muestra el valor de integrar redes de control históricamente separadas. La agrupación de diferentes redes y de más de 800 puntos de control, que integran aforos, embalses, parámetros de calidad y piezometría, en una única plataforma permite optimizar el mantenimiento y ofrecer información pública en tiempo real.

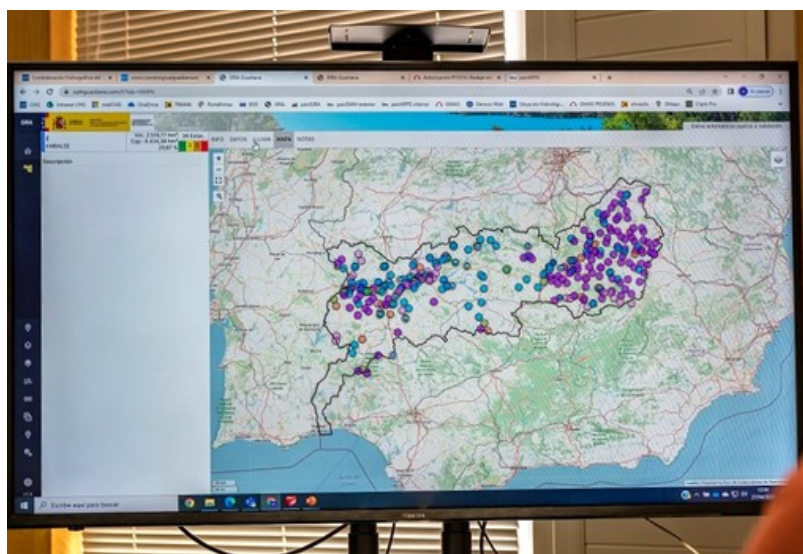


Figura 17 Digitalización en alta de la CHG. Fuente: CHG.

Este caso ilustra una función esencial y a menudo olvidada de la digitalización: la trazabilidad concepcional, que relaciona los volúmenes extraídos con la captación, el título habilitante y el uso autorizado, facilitando la detección de desviaciones.

8.5. Integración en alta implementación BIM de presas de titularidad estatal, C.H. EBRO.

A modo de ejemplo de la transición desde el BIM/GIS estático hacia soluciones con mayor capacidad de integración y actualización, cabe destacar el trabajo que empresas de ingeniería especializadas están llevando a cabo en el ámbito de las infraestructuras hidráulicas. Es el caso de **CIVILE**, empresa que está impulsando la digitalización del sector desde el ámbito de la ingeniería, a través de proyectos como la implementación BIM de presas de titularidad estatal en la Confederación Hidrográfica del Ebro, o el modelado BIM de la presa de La Viñuela (Málaga), junto con la formación impartida a la Secretaría General del Agua de la Junta de Andalucía. En este tipo de proyectos es fundamental el plan de escaneo y captura de datos, el modelado, la validación sin olvidar la formación del personal que va a gestionar los datos.

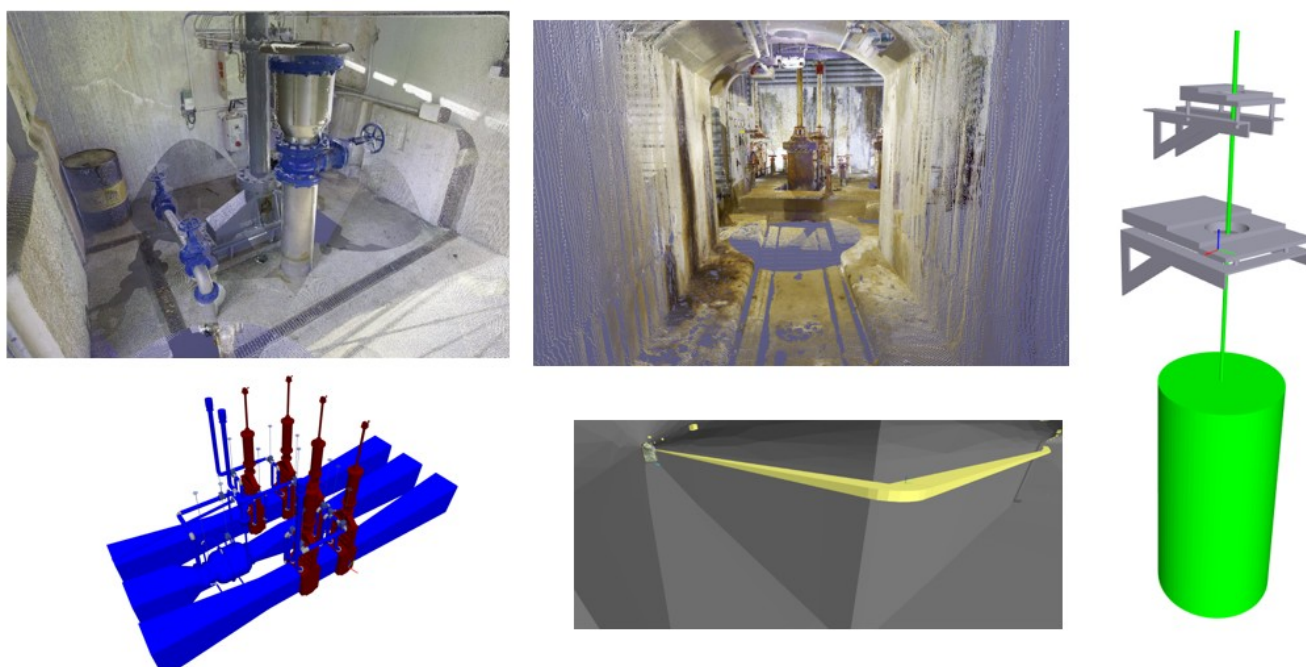


Figura 18 De la nube de puntos al modelo BIM: elementos hidromecánicos y galerías de una presa. Fuente: CIVILE.

De la experiencia acumulada se extraen lecciones especialmente relevantes para cualquier proceso de digitalización de infraestructuras de gran envergadura:

- La importancia de definir unos estándares BIM claros desde el inicio del proyecto.
- La necesidad de coordinación entre los distintos productos digitales (nubes de puntos y modelos) cuando se trabaja a gran escala.
- La conveniencia de digitalizar siguiendo un plan que defina desde el primer momento qué partes de la infraestructura se van a digitalizar.
- La relevancia de contar con una buena base planimétrica del "as built", ya que no todo puede modelarse a partir de la nube de puntos, y esa circunstancia debe quedar reflejada en los datos del modelo para garantizar su trazabilidad.
- La elección de un mapa de softwares óptimo.

- Y, de forma destacada, la **integración BIM-GIS**, que se traduce en un visor que combina la cartografía georreferenciada de la infraestructura (accesos, aliviaderos, cuencos amortiguadores, sistemas de purga, etc.) con la información alfanumérica asociada a cada elemento, permitiendo su consulta y explotación conjunta.

Estos casos ilustran precisamente el matiz señalado anteriormente, donde el modelo BIM y su integración con GIS constituyen la base geométrica, topológica y semántica del activo, pero su verdadero potencial como gemelo digital se alcanza cuando esa información puede mantenerse viva, actualizarse y ponerse al servicio de la gestión y el mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura.

8.6. CREANDO: digitalización del saneamiento en el área metropolitana de Sevilla (EMASESA)

El proyecto CREANDO, impulsado por EMASESA, ilustra la aplicación del PERTE al ámbito del saneamiento en grandes entornos urbanos. Su objetivo es transformar la gestión de un sistema de saneamiento que concentra los vertidos de casi un millón de habitantes, pasando de un modelo reactivo a uno proactivo mediante el uso sistemático de sensorización, inteligencia artificial y modelos digitales, con el fin de mejorar el estado de las masas de agua receptoras y dar cumplimiento al RD 665/2023.

El proyecto se estructura en 19 actuaciones interrelacionadas, entre las que destacan el control de parámetros de cantidad y calidad en colectores y en los desbordamientos de sistemas unitarios y pluviales, un SCADA unificado, un gemelo digital de la red de saneamiento y otro del Complejo Ambiental Copero, así como plataformas de transparencia, co-gobernanza con los organismos de cuenca y de intercambio de datos con el Observatorio Nacional del Ciclo del Agua. El diseño busca que cada actuación aporte valor individual, pero que el beneficio principal surja de su combinación como sistema integrado.



Figura 19 Actuaciones del proyecto CREANDO agrupadas por ámbito de digitalización.

CREANDO fue uno de los proyectos beneficiarios de la segunda convocatoria del PERTE de Ciclo Urbano, en la que compitió con 238 propuestas dirigidas a unos 3.500 municipios españoles. Obtuvo 78 puntos sobre 86 en la evaluación técnica y una ayuda de 9.513.377,37 €, sobre un presupuesto total superior a 10,9 millones de euros. Esta financiación se suma a la obtenida en la primera convocatoria del PERTE con el proyecto Embalse Digital 5.0. Además de los objetivos de digitalización, el proyecto persigue sinergias con infraestructuras complementarias, como la planta de compostaje MITLOP, con una reducción estimada de 4.100.000 kWh/año en necesidades energéticas.

El caso de EMASESA refuerza una idea central de este artículo, donde la digitalización del saneamiento en grandes aglomeraciones urbanas exige combinar el control en tiempo real de vertidos y desbordamientos con la gobernanza compartida entre operador y organismos de cuenca, y que el gemelo digital se conciba no solo para la red de colectores, sino también para las infraestructuras de tratamiento asociadas.

8.7. Lecciones transversales

Los casos analizados muestran que la digitalización genera valor cuando responde a un problema operativo concreto y su resultado puede medirse. La anticipación de averías, la predicción de parámetros de calidad, la detección de anomalías, la integración de redes de control o la optimización del riego constituyen objetivos verificables. Por el contrario, la mera implantación de una plataforma, un modelo o una red de sensores no permite acreditar por sí sola una mejora en la gestión. Por ello, cada proyecto debe partir de una línea base y definir indicadores de resultado, como la reducción de fugas, los días de anticipación de un fallo, la precisión de una predicción, el ahorro energético, la disminución de desplazamientos o la mejora del cumplimiento de los parámetros de calidad.

Una segunda enseñanza es que las soluciones más robustas no sustituyen el conocimiento físico de los sistemas por algoritmos, sino que combinan ambos enfoques. Los modelos hidráulicos, los balances de agua y las relaciones entre variables del proceso aportan interpretabilidad y permiten simular escenarios, mientras que la inteligencia artificial facilita la identificación de patrones, la predicción y la detección de comportamientos anómalos. Los enfoques híbridos ofrecen así un equilibrio entre precisión, capacidad explicativa y coste computacional, especialmente relevante en aplicaciones críticas en las que el operador necesita conocer no solo qué recomienda el sistema, sino también por qué.

Los casos ponen igualmente de manifiesto que la interoperabilidad y la calidad del dato son requisitos previos, no resultados automáticos de la digitalización. La integración de redes históricamente separadas, dispositivos de distintos fabricantes, bases de datos, sistemas GIS, plataformas SCADA y modelos de simulación exige identificadores comunes, formatos abiertos, metadatos, sincronización temporal y procedimientos de validación. Sin esta base, los datos permanecen fragmentados, se dificulta la trazabilidad y el gemelo digital pierde capacidad para representar de forma fiable el sistema físico.

La tercera conclusión al analizar estos casos es que el valor del gemelo digital aparece cuando se incorpora a los procesos ordinarios de explotación y mantenimiento. El modelo debe alimentar alarmas, recomendaciones, órdenes de trabajo, planificación de inversiones o decisiones de operación. Si sus resultados permanecen aislados en una plataforma que solo se consulta de forma ocasional, su utilidad será limitada. La digitalización efectiva exige, por tanto, redefinir los flujos de información, asignar responsabilidades y establecer quién valida los datos, quién interpreta los resultados y quién está autorizado para actuar.

La escalabilidad y la sostenibilidad posterior a la fase de proyecto constituyen asimismo condiciones esenciales. Las soluciones deben poder mantenerse con los recursos disponibles, asumir los costes recurrentes de comunicaciones, licencias, calibración y soporte, y adaptarse a la incorporación de nuevos sensores o instalaciones. Un proyecto piloto técnicamente exitoso puede fracasar al ampliarse si depende de desarrollos cerrados, personal externo o una infraestructura desproporcionada respecto a la capacidad real del operador.

Finalmente, todos los casos confirman que la transformación digital es también una transformación organizativa. La formación del personal, la confianza de los usuarios, la comprensión de las recomendaciones y la participación de quienes conocen la operación diaria condicionan la adopción de las herramientas. La tecnología no sustituye al operador, al técnico ni al regante, sino que amplía su capacidad para interpretar el sistema y adoptar decisiones mejor fundamentadas. En consecuencia, el éxito no depende únicamente de la sofisticación tecnológica, sino de la combinación equilibrada entre datos fiables, modelos adecuados, procedimientos de gestión y conocimiento humano.

9. Innovación y trabajo a desarrollar en los próximos años

La digitalización del agua se encuentra en un momento de inflexión: la inversión pública del PERTE ha sembrado el terreno, pero la cosecha dependerá del trabajo de los próximos años. Desde la perspectiva de la innovación, las prioridades pueden ordenarse en torno a varios ejes.

El primer eje es la **interoperabilidad real y la estandarización**. El reto no es instalar más sensores, sino lograr que los datos fluyan entre sistemas con identificadores únicos, metadatos y unidades normalizadas, evitando que cada plataforma se convierta en un silo. Avanzar hacia estándares abiertos y modelos de datos compartidos es probablemente la innovación de mayor impacto, aunque sea la menos llamativa.

El segundo eje es la **calidad y la gobernanza del dato**. Será necesario consolidar rutinas de validación, mantenimiento de la instrumentación y políticas de retención histórica que garanticen series útiles a largo plazo. Sin datos fiables, la analítica avanzada construye sobre arena.

El tercer eje es el **talento y los nuevos perfiles profesionales**. La etapa de análisis, que hoy es el cuello de botella, exige competencias que combinan ciencia de datos y comprensión de los procesos hidráulicos y biológicos. Formar y retener estos perfiles, e incorporar herramientas que permitan al personal de nivel medio extraer valor de los datos, es una condición de éxito ineludible.

El cuarto eje es la **maduración de los gemelos digitales**, especialmente en la depuración, donde las implementaciones documentadas siguen siendo escasas. El avance pasa por consolidar los enfoques híbridos (mecanicista más datos), por clarificar qué se entiende por conectividad en tiempo real en cada aplicación y por integrar progresivamente los gemelos de unidades de proceso en sistemas de soporte a la decisión más amplios que trasciendan la planta e incorporen la ciudad y la cuenca.

El quinto eje es la **resiliencia climática y la economía circular**. La digitalización debe orientarse explícitamente a anticipar sequías e inundaciones, a optimizar la reutilización del agua regenerada bajo el nuevo marco normativo y a recuperar recursos, energía, nutrientes, información epidemiológica, de las aguas residuales, en línea con la visión de la Industria 5.0.

El sexto eje es el **escalado supramunicipal y la equidad territorial**, para que la digitalización no amplíe la brecha entre grandes y pequeños operadores, sino que la reduzca mediante centros de control compartidos y servicios mancomunados.

Y el séptimo eje son las **métricas de éxito**. La evaluación de los proyectos no debe limitarse al porcentaje de ejecución presupuestaria, sino medir la mejora efectiva del balance hídrico, la reducción de pérdidas, la anticipación de averías, el control de los desbordamientos, la eficiencia energética y la transparencia. Definir y publicar estos indicadores es, en sí mismo, un acto de innovación en la gobernanza.

10. Conclusiones

La digitalización del ciclo integral del agua solo alcanza su sentido pleno cuando deja de entenderse como una acumulación de sensores, contadores y plataformas, y se concibe como una continuidad informativa capaz de acompañar al agua desde su origen hasta su devolución al medio. El valor no reside en el dato medido, sino en el dato que se valida, se contextualiza y se convierte en una decisión que mejora de manera comprobable la operación, el mantenimiento, la planificación y la gobernanza.

Por ello conviene asumir que esta transformación es un proceso progresivo de madurez. Las capacidades más avanzadas, como la inteligencia artificial o los gemelos digitales, únicamente ofrecen resultados fiables cuando se apoyan en una instrumentación suficiente, en series históricas de calidad, en sistemas interoperables y en responsabilidades claras sobre la gestión de la información. La lógica de medir, analizar y decidir resume bien esta idea, puesto que medir sin analizar genera costes, analizar sin actuar produce informes inertes y decidir con datos incompletos crea una falsa sensación de control. La digitalización se completa cuando la decisión actúa sobre el sistema físico y sus efectos vuelven a medirse, de modo que la retroalimentación mejore los modelos posteriores. En consecuencia, los gemelos digitales no deben convertirse en una finalidad, ya que su utilidad depende de que mantengan una conexión efectiva con su contraparte física y de que se integren en sistemas que modifiquen realmente la operación. En infraestructuras críticas, además, la inteligencia artificial debe ampliar la capacidad del operador y nunca sustituir su conocimiento ni eliminar la supervisión humana.

No obstante, es importante poner de manifiesto la diferencia existente entre el alcance esperado y el alcanzado por los PERTE. Conviene también reconocer las dificultades que han marcado su despliegue. La ambición del instrumento ha sido considerable, aunque su ejecución ha tropezado con obstáculos que no deben obviarse, porque sea simplemente, políticamente correcto. En primer lugar, los plazos impuestos por los fondos europeos han resultado especialmente exigentes, ya que han obligado a diseñar, licitar, desplegar y justificar proyectos complejos en un periodo notablemente breve para un cambio de paradigma de esta magnitud. Los tiempos de la política, de la legislación, de las licitaciones públicas y de la implementación de las actuaciones NO SON IGUALES.

Transformar la cultura de gestión del agua no se logra en pocos ejercicios presupuestarios, sino que requiere maduración técnica, aprendizaje organizativo y continuidad. Además, la maquinaria administrativa no siempre ha acompañado al ritmo previsto, puesto que la contratación, la coordinación entre administraciones y la propia capacidad de absorción de las entidades gestoras han generado retrasos y, en ocasiones, han forzado a priorizar la rapidez sobre la solidez.

Tampoco debe pasarse por alto la distancia que separa las cifras anunciadas de los resultados efectivamente consolidados. Movilizar una inversión sin precedentes no equivale a transformar el sector, ya que parte de lo desplegado todavía deberá demostrar su utilidad cuando desaparezca la presión del calendario. Por ese motivo, su éxito no puede medirse por el presupuesto ejecutado ni por el número de dispositivos instalados, sino por **resultados verificables** como la reducción de pérdidas, el ahorro energético, la anticipación de averías, el control de vertidos y la mayor resiliencia frente a sequías e inundaciones. La fase decisiva comienza después de la instalación, porque los sistemas deberán mantenerse, calibrarse, protegerse y actualizarse incluso cuando se agote la financiación extraordinaria. Parece prudente, en definitiva, entender los PERTE como un impulso inicial valioso y no como un punto de llegada.

Asimismo, será necesario evitar que la digitalización amplíe la brecha entre los grandes operadores y los municipios pequeños. Las diputaciones, los consorcios y las entidades supramunicipales pueden reducir esa desigualdad mediante centros de control compartidos y servicios comunes de mantenimiento. Del mismo modo, la interoperabilidad, la gobernanza y la apertura del dato seguirán siendo grandes desafíos, ya que la transparencia no consiste en publicar registros sin orden, sino en ofrecer información completa, comprensible y contextualizada.

Llegados a este punto, conviene recordar que el sentido último de toda esta transformación no es tecnológico, sino humano. La calidad del dato y la transparencia constituyen la base de la **confianza**, y la **innovación** que necesita el sector no es la que acumula más tecnología, sino la que logra que administraciones, técnicos y ciudadanía conozcan mejor el sistema y decidan con fundamento. En esta

idea resuena bien lo que afirma Matt Mullenweg, cofundador de WordPress y fundador de la empresa Automattic, cuando sostiene que “la tecnología es mejor cuando une a las personas”. Esa será la mejor vara para medir el éxito de la digitalización del ciclo integral del agua, puesto que el reto de los próximos años consistirá en consolidar lo construido, conservar las series históricas y demostrar que la digitalización produce una gestión del agua más eficiente, resiliente, transparente y humana.



11. Referencias

- Baena-Miret, S., Alet Puig, M., Bardisa Rodes, R., Bonastre Farran, L., Durán, S., Ganzer Martí, M., Martínez-Gomariz, E., & Carrasco Valverde, A. (2024). Enhancing efficiency and quality control: The impact of Digital Twins in drinking water networks. *Water Environment Research*, 96(9), e11139. <https://doi.org/10.1002/wer.11139>
- Gamze, A., Gamze D., & Baba, A. (2026). Urban digital twins and water sensitive urban design: A systemic literature review. *Sustainable Cities and Society*, 145 (2026) 107456. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107456>
- Giustolisi, O. (2024). Digital transition, digital twin and digital water: History, concepts and overview for the application to aqueducts. *Digital Water*. <https://doi.org/10.1080/digitalwater.2024>
- Karmous-Edwards, G., Vlachos, P., & DeMonsabert, S. (2019). Digital twins for water utilities: The next frontier in water management. *Journal AWWA*.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua: convocatorias y resoluciones*. Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. <https://planderecuperacion.gob.es>
- Pedersen, A. N., Borup, M., Brink-Kjær, A., Christiansen, L. E., & Mikkelsen, P. S. (2021). Living and prototyping digital twins for urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors. *Water*, 13(5), 592. <https://doi.org/10.3390/w13050592>
- Poch, M., Garrido-Baserba, M., Corominas, L., Perelló-Moragues, A., Monclús, H., Cermerón-Romero, M., Melitas, N., Jiang, S. C., & Rosso, D. (2020). When the fourth water and digital revolution encountered COVID-19. *Science of the Total Environment*, 744, 140980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140980>
- Quaghebeur, W., Nopens, I., & De Baets, B. (2022). Incorporating unmodeled dynamics into first-principles models through machine learning. *IEEE Access*, 9, 22014–22022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055353>
- Restuccia, G., Giuliano, F., & Garlisi, D. (2025). LoRaWAN AI-powered digital twins for smart water distribution networks. In *2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978232>
- Stentoft, P. A. (2020). *Model predictive control of water resource recovery facilities* [Doctoral dissertation, Technical University of Denmark].
- Torfs, E., Nicolaï, N., Ikumi, D., Snowling, S., Vanrolleghem, P.A., Daneshgar, S., Johnson, B., Copp J. B., Plosz B.B., Townley L.R., Vezzaro, L., Valverde-Pérez, B., Nopens, I., (2022). The transition of WRRF models to digital twin applications. *Water Science & Technology* Vol 85 No 10, 2840. doi: 10.2166/wst.2022.107
- Trifi D., González Barberá, A. , Gómez J.L., Prades, Ò., Monrós Andreu, G., Barreda, P., Climent, J., Arnau Notari, R., Chiva, S. (2026). *Towards a real-time digital twin: accelerating activated sludge reactor CFD via AI-enhanced hydrodynamic surrogate model*. Proceedings of the 10th Water Resource Recovery Modelling Seminar (WRRMod2026).
- Valverde-Pérez, B., Johnson, B., Wärrf, C., Lumley, D., Torfs, E., Nopens, I., Townley, L. (2021). Digital Water. Operational digital twins in the urban water sector: case studies. International Water Association (IWA).