

Sequías y calidad del agua: reutilización de agua regenerada para consumo humano

José M^a Ordóñez Iriarte, María Luisa González Márquez, Pere Serra Costa, Irene Corbella Cordoní

En el número anterior de Revista de Salud Ambiental, en la Sección *Una mirada desde Europa*, se abordó el tema de las inundaciones, las sequías y la calidad del agua. Sin embargo, esta “mirada” se centró en las inundaciones por dos aspectos complementarios: los graves efectos derivados de la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) de Valencia, que había ocurrido recientemente en el mes de octubre del año 2024 y porque “en todos los escenarios futuros de cambio climático, se proyecta que los riesgos directos e indirectos de inundaciones aumentarán a lo largo del siglo XXI”^{1,2}.

Los periodos de inundaciones se alternarán con los de sequías. Actualmente hay una preocupación cada vez mayor por las sequías, cuya frecuencia e intensidad han aumentado en los últimos años en varias regiones del mundo, provocando impactos destacables, no solo en la disponibilidad de agua para los ecosistemas, agricultura y actividades económicas de todo tipo, sino también para el consumo humano, con los problemas de salud pública que de ello se pueden derivar³⁻⁵.

Conscientes de esta problemática, se han arbitrado en España los Planes Especiales de Sequía (PES) por cada una de las demarcaciones hidrográficas. Estos planes cuentan con unos indicadores, tanto de escasez, como de sequía, que permiten “la identificación objetiva de situaciones persistentes e intensas de disminución de las precipitaciones, con reflejo en las aportaciones hídricas en régimen natural, en la Unidad Territorial de Sequía (UTS) Cabecera”⁶. Por otro lado, este seguimiento se complementa con la aplicación AdapteCCA que simula escenarios, entre ellos el de precipitaciones a medio y largo plazo⁷. Las previsiones a medio plazo no son nada halagüeñas para la gran mayoría de las Comunidades Autónomas⁷.

El objetivo general del Plan Especial de Gestión de Sequías es, de acuerdo con el mandato incluido en el artículo 27.1 de la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional, minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales de eventuales episodios de sequías, entendidas en este caso con carácter genérico. Este objetivo general tiene uno específico que es objeto directo de la Salud Ambiental: “Garantizar la disponibilidad de agua requerida para asegurar la salud y

la vida de la población, minimizando los efectos negativos de sequía y escasez sobre el abastecimiento urbano”⁸.

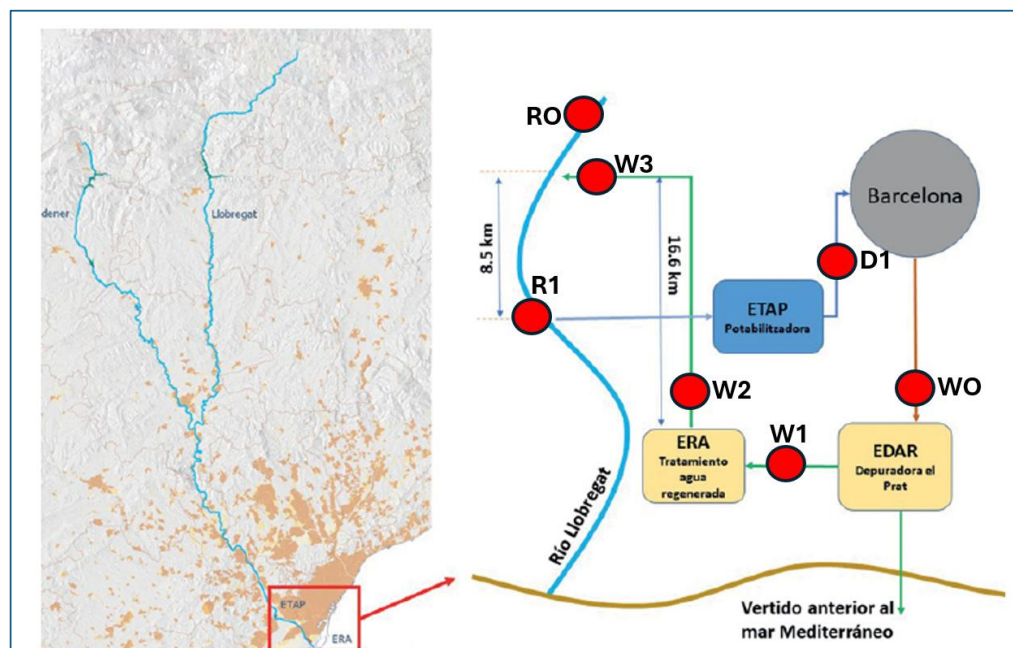
En Cataluña, ante una sequía persistente en estos últimos años, se ha abordado una experiencia que servirá, sin duda, para trasladarla a otras latitudes no solamente españolas; de ahí la importancia de que sea conocida por la Salud Ambiental de la Administración General y de las Comunidades Autónomas. A las medidas tradicionales de limitación de consumos y aportación de recursos alternativos como la desalación del agua marina, esta experiencia ha incorporado la reutilización potable indirecta, como medida prevista en el PES⁹.

Se entiende por **reutilización potable indirecta** como el método para reutilizar agua residual regenerada que es mezclada en un “amortiguador ambiental” (como un lago, río o acuífero) desde el que se extrae posteriormente para la producción de agua de consumo humano. En el caso de ser utilizada para consumo humano sin ser mezclada previamente con un cuerpo de agua, se trataría de reutilización potable directa¹⁰.

La depuradora de aguas residuales del Prat de Llobregat (EDAR) trata un promedio de 3 m³/s, que supone un 35% del agua residual que se genera en el Área Metropolitana de Barcelona. Se trata de una depuradora biológica con capacidad para reducir nutrientes, que está equipada con una estación de regeneración de agua (ERA). El proceso de regeneración incluye una coagulación-floculación y una decantación lamelar lastrada, seguidas de una filtración mediante microtamices (10 µm) y una desinfección combinada mediante radiación ultravioleta (50 mJ/cm²), y opcionalmente hipoclorito sódico¹¹.

El efluente de esta depuradora se reutiliza en su práctica totalidad de forma continua. Sin embargo, el uso del agua regenerada varía en función de la situación hidrológica. En condiciones normales, se utiliza principalmente para mantener el caudal ecológico. En situaciones de escasez, si la sequía empeora, se incrementa la aportación de agua regenerada, que se incorpora al río Llobregat por encima (8,5 Km) de la captación de la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) de Sant Joan Despí (figura 1), lo que se conoce como reutilización potable indirecta (RPI)¹¹.

Figura 1. Localización del río Llobregat, esquema de la reutilización potable indirecta de Barcelona y puntos de muestreo



Fuente: Molist J¹¹.

En esta RPI, el agua regenerada se mezcla con el caudal del río Llobregat y se capta aguas abajo para ser potabilizada. La planta potabilizadora cuenta con dos líneas de tratamiento avanzado, que operan en paralelo: después de una etapa inicial común a ambos tratamientos (que incluye desarenado, preoxidación con dióxido de cloro, floculación, decantación y filtración con arena) el agua se divide en dos líneas independientes: por un lado, el tratamiento de ozono y filtración en carbono activo y, por el otro, el tratamiento de ultrafiltración y ósmosis inversa (más remineralización). Finalmente, el agua de ambas líneas se mezcla, se clora y se distribuye¹¹.

Esta experiencia se inició en 2019 como prueba piloto, en base a los resultados obtenidos en un estudio preliminar llevado a cabo en el año 2009, y pasó a ejecutarse en el marco de acción prevista en el PES cuando esta unidad de explotación entró en estado de excepcionalidad por sequía. El objetivo de la prueba piloto fue identificar los riesgos químicos y microbiológicos que dicha RPI podía ocasionar para la salud y el ecosistema fluvial a distintas diluciones de agua regenerada con el agua de río, y determinar las condiciones en las que ésta se podía realizar.

La metodología de trabajo fue la siguiente.

1. CONSTITUCIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO Y PANEL DE ASESORES

Coordinado por la Agencia Catalana de Agua se creó un grupo de trabajo formado por profesionales de dicha Agencia, del Área Metropolitana de Barcelona y Aguas de

Barcelona, como operadores implicados, y de la Secretaría de Salud Pública de Cataluña. La función de este grupo era diseñar el estudio piloto, establecer los valores de referencia necesarios para cada compuesto estudiado, evaluar y hacer seguimiento de los resultados y definir las condiciones de esta RPI. Se mantuvieron reuniones semanales o quincenales durante toda la prueba piloto y las fases posteriores de aplicación de la RPI.

Así mismo, se creó un Panel científico Asesor, integrado por miembros de diversos centros de investigación y tecnológicos, cuya función era valorar las propuestas elaboradas por el grupo de trabajo.

Se aplicaron los principios del enfoque preventivo de los Planes Sanitarios del Agua (PSA) y los Planes de Seguridad en el Saneamiento (PSS) para abordar el estudio y la implantación de la RPI.

2. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA REGENERADA

Esta verificación no se limitó únicamente a la comprobación del cumplimiento de las normativas de calidad vigentes, sino que también se incluyeron numerosos compuestos adicionales, actualmente no regulados, que fueron seleccionados en base a un análisis del riesgo específico y según su probabilidad de estar presentes en el agua regenerada. Se seleccionaron 376 compuestos (de un total de 265 compuestos químicos y 570 fármacos previamente identificados) y 4 indicadores microbiológicos para su evaluación.

Para definir estos 376 compuestos, se tuvieron en cuenta los compuestos ya regulados en las normativas vigentes (de agua potable y de vertidos), las autorizaciones de vertidos industriales al sistema de saneamiento, la probabilidad de presencia de compuestos farmacéuticos (en función de las estimaciones de dosis diarias de medicamentos prescritos en las Áreas Básicas de Salud, y metabolismo y eliminación humana)..., medicamentos utilizados en los hospitales, medicamentos veterinarios, los metabolitos de estos medicamentos, biocidas utilizados, subproductos de la desinfección, compuestos domésticos, compuestos resultantes de resultados de estudios realizados terminantemente,... Además, para cada sustancia se tuvo en cuenta su importancia sanitaria y ambiental, su comportamiento en el medio en función de sus características fisicoquímicas (pKa o ionización ácida, biodegradabilidad, fotodegradabilidad,...) y la probabilidad de detección después del tratamiento, proceso de dilución y acción de autodepuración del río.

Los valores guía para cada uno de los 376 compuestos considerados (111 de ellos fármacos y agentes de contrastes radiológicos y compuestos de uso doméstico), o bien están recogidos en su propio marco normativo, o bien se definieron, teniendo en cuenta las ingestas diarias admisibles (IDA), el NOAEL (Nivel sin Efecto Adverso Observable, en inglés) para sustancias con umbral de efecto y el factor de pendiente (SF, en inglés) para los que no tienen umbral. En el caso de los compuestos farmacéuticos que no tienen valores de IDA, el valor guía se calculó en base a las dosis mínimas terapéuticas (DMT).

En el caso de no disponer de datos toxicológicos específicos se utilizó el enfoque del TTC (*Threshold of Toxicological Concern*) como herramienta pragmática de cribado y priorización para su uso en la evaluación del riesgo.

Para la evaluación del riesgo para el ecosistema acuático se tuvieron en cuenta los compuestos regulados en la normativa vigente (Directiva de sustancias prioritarias y prioritarias peligrosas) o, cuando no estaban reguladas, a partir de datos de toxicidad ambiental mediante el valor de la concentración prevista sin efecto (PNEC, por sus siglas en inglés).

Para el control microbiológico se tuvieron en cuenta los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS), así como otras guías de países de referencia en RPI^{10,12-14}. Se seleccionaron principalmente indicadores microbianos asociados a los principales grupos de patógenos (bacterias, virus y protozoos): *Escherichia coli* como indicador de bacterias patógenas, colifagos somáticos como indicadores de virus patógenos y esporas de *Clostridium perfringens* como indicador de protozoos. Así mismo se evaluaron virus entéricos y se realizó un screening de patógenos por PCR (FilmArray).

3. PUNTOS DE MUESTREO Y MÉTODOS ANALÍTICOS.

Los puntos de muestreo se encuentran señalados en la Figura 1. Se establecieron puntos de muestreo en las aguas residuales crudas justo antes de la EDAR (W0), después del tratamiento biológico (W1), después del tratamiento de regeneración (W2) y justo antes del vertido al río Llobregat, 16,6 km aguas arriba de la EDAR (W3). Dos puntos de muestreo se ubicaron en el río Llobregat: uno justo antes del vertido de agua reutilizada (R0) y otro 8,5 km aguas abajo (R2), justo antes de la toma de agua hacia la estación de tratamiento de agua potable (ETAP). Se ubicó un punto de muestreo adicional a la salida de la ETAP, que abastece de agua potable a Barcelona, para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua potable distribuida (D1)⁹.

La prueba piloto se planificó durante seis semanas, entre junio y julio de 2019 (verano), con el fin de encontrar un período seco con escasa dilución de agua, buscando el peor escenario posible (como una sequía severa). Las primeras muestras se recolectaron el 4 de junio y las últimas el 24 de julio⁹.

A partir de diciembre de 2022 se inició la RPI incrementando la aportación de agua regenerada de forma progresiva desde una dilución 1:8 hasta dilución 1:2. En marzo de 2023, con la entrada del estado de excepcionalidad en la zona, se llegó a dilución 1:1, hasta abril de 2025.

Debido a la amplia variedad y heterogeneidad de los microcontaminantes incluidos en este estudio, su análisis químico se llevó a cabo mediante un enfoque multimétodo: cromatografía de gases con detector de captura de electrones, cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en tándem (GC-MS/MS), espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), etc.⁹

En cuanto a los indicadores microbiológicos, se contaron las *E. coli* cultivables utilizando el método del número más probable (NMP) según la norma UNE EN ISO 9380:2, los colifagos somáticos se enumeraron según la norma UNE EN ISO 10705-2 y las esporas de *Clostridium perfringens* se enumeraron según un método interno acreditado por la norma ISO 17025 y basado en la norma UNE EN ISO 14189:2017.

Además de los análisis específicos de cada compuesto, como método complementario de caracterización analítica, con la finalidad de identificar cualquier otro posible compuesto presente en el agua, se realizaron análisis "Non-target" (NTA), que está basado en cromatografía de gases acoplada a espectrometría

de masas de alta resolución Orbitrap[®]) y herramientas computacionales para detectar e identificar compuestos químicos desconocidos o sospechosos.

RESULTADOS

El agua regenerada vertida al río Llobregat tras un tratamiento en la ERA del Prat de Llobregat no afectó significativamente la calidad del agua del río, incluso en el caso de sequía extrema (dilución 1:1 entre el caudal del río y el agua regenerada vertida)⁹.

Durante la fase piloto los compuestos que se detectaron a la salida de la ETAP fueron el 1,4-dioxano, los plaguicidas acetamiprid e imidacloprid, el repelente de insectos DEET (N,N-dietiltoluamida), los edulcorantes acesulfam y sucralosa, el antioxidante tolitriazol, el agente de contraste radiológico iomeprol y las drogas MDMA (3,4-metilendioximetanfetamina, conocida como éxtasis) y cotinina. De ellos, sólo el 1,4-dioxano y el DEET superaron en una muestra el valor guía establecido en base al riesgo para la salud. Como consecuencia de la superación del 1,4-dioxano se adoptaron medidas inmediatas sobre las industrias responsables del vertido de este compuesto a la EDAR.

Durante la fase de implementación de la RPI los compuestos que se detectaron a la salida de la ETAP fueron el 1,4-dioxano, el metabolito AMPA (Ácido Aminometilfosfónico) derivado del plaguicida glifosato, los PFAS L-PFBS y PFPeA, PFOS, los medicamentos Amantadine, hidroclorotiazida y Valsartan y los agentes de contraste radiológico iomeprol y Iopromide. Sólo en una muestra se superó el valor guía propuesto para el AMPA, aunque sin exceder el valor guía de la OMS¹⁵.

Por su parte, otros diez contaminantes (bromodicloro metano, dibromoclorometano, cloroformo, el metabolito de la metadona EDDP (2-etilideno-1,5-dimetil-3,3-difenilpirrolidina), diclofenaco, iopamidol, ioprimid, lamotrigina, ofloxacina y valsartán) representaron un riesgo potencial para el medio ambiente⁹.

La carga microbiana disminuyó a lo largo de los dos procesos de tratamiento, primero a través de la EDAR y la ERA (desde los puntos de muestreo W0 a W3) y luego a través de la ETAP, hasta alcanzar valores indetectables (<1/100 ml) en el suministro de agua potable (en el punto de muestreo D1).

Todos los resultados de los indicadores microbiológicos medidos en el agua potable tratada estuvieron por debajo del límite de cuantificación.

PROPUESTA

Como ya se ha comentado, las previsiones de escasez de agua y sequía pueden convertirse en un problema al que algunas Comunidades Autónomas españolas tendrán que enfrentarse, más pronto que tarde. No se trata solo de mantener los caudales ecológicos necesarios para la autodepuración de los ríos y la vida acuática; se trata de cumplir con un objetivo de **salud pública** claramente recogido en el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro¹⁶: “proveer [...] al menos, 100 litros por habitante y día” y calidad de agua, “deberá ser salubre y limpia en el punto de cumplimiento de agua de suministro público”.

Sin duda, esta experiencia reafirma la importancia para que la Salud Ambiental española se implique en los Planes Hidrológicos y Planes Especiales de Sequía, con el objeto que marca, tanto la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, (versión refundida)¹⁷, como el Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos reales decretos que regulan la gestión del agua¹⁸: “garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para los usos establecidos y, de esta forma, garantizar un alto nivel de protección del medio ambiente, de la **salud humana** y de la sanidad animal”.

Este es un nuevo reto que se plantea como propuesta para la Salud Ambiental: la evaluación del riesgo ante nuevas actuaciones en el marco de la economía circular del agua que implica la salud de la población.

AGRADECIMIENTOS

La RPI en el Llobregat ha sido posible gracias al trabajo intenso y coordinado realizado por el Grupo de trabajo, formado por la Agencia Catalana del Agua (Toni Munné, Jordi Molist, Pau Comas, Sebastià Datzira, José Luis Jurado, Josep Sanchís, Carolina Solà y Enrique Velasco), el Departamento de Salud de la Generalitat de Cataluña (Anna Belver, Irene Corbella, Xavier Costas, Pere Serra y Pilar Veciana), el Área Metropolitana de Barcelona (Mercè Aceves, Fernando Cabello, María Indurain y Francisco Salguero) y Aguas de Barcelona (María Rosa Boleda, Belen Galofré, Marta Ganzer, Jordi Fontana, José Mesa, Miquel Paraira y Àngels Vidal).

Así mismo, gracias a las aportaciones y la colaboración de los miembros del Panel Científico Asesor, integrado por Antoni Ginebreda (IDAEA-CSIC), Damià Barceló (ICRA & IDAEA-CSIC), Francisco Lucena (MARS-IdRA-UB), Irene

Jubany (CTM-EURECAT), Jesús Gómez-Catalán (GRET-UB), Joan Jofre (MARS-IdRA-UB), Josep Caixach (IDAEA-CSIC), Lluís Reales (BTV), Narcís Prat (FEHM-IdRA-UB), Rafael Mujeriego (UPC), Wolfgang Gernjak (ICRA, ICREA) y Xavier Martínez- Lladó (CTM-EURECAT).

BIBLIOGRAFÍA

- Ordóñez Iriarte JM. Inundaciones, sequías y calidad el agua. *Rev. Salud ambient.* 2025; 25(1):106-7.
- UK Health Security Agency. Guidance Flooding and health: an overview. [citado el 13 de marzo de 2025] Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/flooding-and-health-advice-for-frontline-responders/flooding-and-health-an-overview>.
- Luna MY, Skansi M. Eventos meteorológicos extremos. Sequías y salud. En Linares Gil C, Díaz Jiménez J, Chesini F, Ordóñez Iriarte JM (coord.) Informe técnico Cambio climático y salud: Una visión iberoamericana. Sociedad Española de Salud Pública y Administración Sanitaria (SESPAS) y Sociedad Iberoamericana de Salud Ambiental (SIBSA). Madrid, 2022.
- Vicente-Serrano SM, Quiring SM, Peña-Gallardo M, Yuan S, Domínguez-Castro F. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Sci. Rev.* 2019; 201, 102953.
- Salvador C, Nieto R, Linares C, Díaz J, Gimeno L. Effects of droughts on health: Diagnosis, repercussion, and adaptation in vulnerable regions under climate change. Challenges for future research. *Sci. Total Environ.* 2020; 703, 134912.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Confederación Hidrográfica del Tajo. Gráficos de la evolución de los indicadores de sequía. Diciembre 2024. [citado el 13 de noviembre de 2025] Disponible en: <https://www.chtajo.es/documents/d/guest/inf-indicadores-sequia-2024-12>.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Visor de Escenarios de AdapteCCa. [citado el 13 de noviembre de 2025] Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/adaptecca.html>.
- Orden TEC/1399/2018, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la revisión de los planes especiales de sequía correspondientes a las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar; a la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro; y al ámbito de competencias del Estado de la parte española de la demarcación hidrográfica del Cantábrico Oriental. B.O.E. núm 311, de 26 de diciembre de 2018.
- Munné A, Solà C, Ejarque E, Sanchís J, Serra P, Corbella I, et al. Indirect potable water reuse to face drought events in Barcelona city. Setting a monitoring procedure to protect aquatic ecosystems and to ensure a safe drinking water supply. *Sci. Total Environ* 2023; 866, 161339.
- Environmental Protection Agency. Reutilización de agua potable y agua para consumo humano. [citado el 13 de noviembre de 2025] Disponible en: https://www.epa.gov.translate.google/ground-water-and-drinking-water/potable-water-reuse-and-drinking-water?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=Indirect%20potable%20reuse%20Uses%20an,water%20without%20an%20environmental%20buffer.
- Molist J, Munné A. Reutilización potable indirecta en Barcelona. *Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA)*, mayo-junio 2023. [citado el 13 de noviembre de 2025] Disponible en: <https://www.retema.es/articulos-reportajes/reutilizacion-potable-indirecta-en-barcelona>.
- World Health Organization. Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. Geneva: World Health Organization; 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. D.O.U.E. 5/6/2020.
- Water Quality Australia. Australian. Guidelines for Water Recycling. Augmentation of Drinking Water Supplies, 2008. [citado el 3 de diciembre de 2025] Disponible en: <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>.
- Munné A, Fraile J, Molist J, Sanchís J, Solà C, Corbella I, Serra P et al. Human and environmental risk monitoring of Indirect Potable Water Reuse supplied to Barcelona under a severe long-term drought period (2021-2024). A successful water resilience strategy. *Enviado a Water Reuse Journal* (submitted).
- Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. B.O.E. núm. 9, de 11/01/2023.
- Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, (versión refundida). D.O.U.E. núm. 3019, de 12 de diciembre de 2024.
- Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos reales decretos que regulan la gestión del agua. B.O.E. núm. 256, de 23 de octubre de 2024.