

# SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO  
M<sup>a</sup> INMACULADA LÓPEZ ORTIZ  
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL



# SEGURIDAD HÍDRICA



© los autores, 2023  
© de esta edición: Universitat d'Alacant  
ISBN: 978-84-1302-234-5

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

# TABLA DE CONTENIDO

## BLOQUE I - PLANIFICACIÓN

<b>Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Traspase Tajo-Segura</b> José Navarro Pedreño.....	19
<b>Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica</b> Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa .....	39
<b>Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios</b> Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
<b>La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales</b> Alberto del Villar García.....	73
<b>La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío</b> Francisco Javier Alcántara Pérez .....	93
<b>Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato</b> Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
<b>Resignificando la ciudad como biotopo humano</b> Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez .....	117
<b>Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil</b> Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza .....	133
<b>Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés</b> Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino .....	141
<b>Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España</b> Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo .....	151
<b>Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador</b> Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
<b>Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador)</b> Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
<b>El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico</b> Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

**¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?**

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad .....197

**Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040**

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá .....207

**El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)**

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez ..... 219

**BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS**

**Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del seguro. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades**

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez .....231

**Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España**

Luis Garrote de Marcos ..... 249

**Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas**

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo ..... 269

**Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas**

Luis Altarejos García ..... 295

**La seguridad de las infraestructuras hidráulicas**

Francisco Javier Flores Montoya .....315

**La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética**

Francisco Javier Flores Montoya .....325

**La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad**

Ignacio Lozano Colmenarejo .....345

**BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife**

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí .....363

**El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica**

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís .....381

**El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas**

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso ..... 399

**El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías**

Jaime Berenguer Ponsoda .....409

**Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad**

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz .....439

**La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado**

Rosa Rozas Torrente, M<sup>a</sup> José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaime .....451

<b>Microsectorización dinámica redes de distribución de agua</b>	
Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
<b>Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones</b>	
Leonardo Bayas-Jiménez .....	477
<b>Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos</b>	
Izaias de Souza Silva.....	487

### **BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA**

<b>La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura</b>	
Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
<b>El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas</b>	
Estanislao Arana García .....	511
<b>Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos</b>	
Jesús Conde Antequera .....	529
<b>La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social</b>	
José Esteve Pardo.....	549
<b>Huella hídrica y financiación sostenible</b>	
Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
<b>¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica</b>	
Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito .....	577
<b>Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua</b>	
Nazaret M <sup>a</sup> Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
<b>Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica</b>	
José Antonio Blanco Moa .....	613
<b>SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua</b>	
Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
<b>Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública</b>	
Esteban Arimany Lamoglia .....	643
<b>Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla</b>	
Patricia Fernández Aracil, M <sup>a</sup> Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
<b>La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?</b>	
Carlos Martín Cantarino.....	677



<b>La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica</b>	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo .....	695
<b>Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica</b>	
Francisco José Abellán Contreras .....	709
<b>Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica</b>	
Paul Villegas Vega .....	723
<b>Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante</b>	
Ricardo Abad Coloma .....	735
<b>Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante</b>	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós .....	745
<b>Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia</b>	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín .....	759
<b>O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais</b>	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho .....	773
<b>Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais</b>	
André Luiz Anrain Trentini .....	783
<b>Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições</b>	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini .....	795
<b>Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade</b>	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa .....	805
<b>O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil</b>	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli .....	815
<b>Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha</b>	
Leandro Katscharowski Aguiar .....	827
<b>Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....</b>	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia .....	837
<b>A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil</b>	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates .....	851
<b>Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais</b>	
Vanessa Ramos Casagrande .....	863
<b>A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica</b>	
Anaxágora Alves Machado Rates .....	875
<b>A canção dos oceanos</b>	
Paola Fava Saikoski .....	885

<b>Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental</b>	
Adilor Danieli .....	895
<b>Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo</b>	
Yang Yang.....	907
<b>Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre</b>	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

## **BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS**

<b>Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes</b>	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
<b>Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental</b>	
María Tuesta San Miguel.....	953
<b>Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales</b>	
Daniel Prats Rico.....	959
<b>Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío</b>	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
<b>La desalación y el hidrógeno</b>	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
<b>Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español</b>	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
<b>Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela</b>	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
<b>Modelado cinético del consumo de CO<sub>2</sub> para la cepa Spirulina platensis</b>	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
<b>Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego</b>	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
<b>Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización</b>	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
<b>Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua</b>	
Albert Canut Montalvã, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

<b>Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER</b> Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
<b>Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono</b> Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
<b>Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus</b> Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
<b>Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua</b> Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
<b>Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor</b> Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
<b>Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora</b> Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

# Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales

**Daniel Prats Rico**

Catedrático Emérito de Ingeniería Química, Universidad de Alicante, España

[prats@ua.es](mailto:prats@ua.es)

<https://orcid.org/0000-0002-5727-7479>

## RESUMEN

Recientemente se ha publicado una propuesta de reforma de la directiva 91/271/CEE relativa al tratamiento de aguas residuales urbanas. La revisión prevé importantes cambios en los requisitos de tratamiento de las aguas residuales orientados a reducir la contaminación actualmente remanente con el agua depurada. En este trabajo se aborda la problemática de los contaminantes emergentes y su tratamiento en la reforma prevista, en la que se prevé aplicar un tratamiento cuaternario específico para la reducción de microcontaminantes. Se describen las distintas tecnologías que permiten la remoción de contaminantes emergentes, y se destacan aquellas más factibles para su aplicación a gran escala.

## 1. PROBLEMÁTICA DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

### 1.1. Concepto de contaminantes emergentes

Los productos químicos sin duda aportan beneficios a la sociedad, pero pueden liberarse al medio ambiente durante sus ciclos de vida y en algunos casos pueden causar daños a los seres humanos y los ecosistemas. El número de productos químicos que se emplean industrialmente es enorme. En un reciente estudio de Wang et al. (2020), tras analizar 22 inventarios de productos químicos de 19 países y regiones identifican más de 350.000 productos químicos y mezclas de productos químicos en el mercado, se, lo que presenta hasta tres veces más de lo estimado anteriormente. Las características de muchos de estos productos químicos son públicamente desconocidas porque se declaran confidenciales (más de 50 000) o se describen de manera ambigua (hasta 70.000). Dulio et al. (2018) informan que entre 30.000 y 50.000 sustancias químicas industriales se encuentran contenidas en los productos de uso diario.

Muchas de estas sustancias químicas pueden presentar problemas de toxicidad o riesgo ambiental, y su distribución y aplicación debe ser controlada. En EEUU, la Ley de Control de Sus-

tancias Tóxicas (TSCA)<sup>1</sup> requiere que la agencia de protección ambiental, U.S. Environmental Protection Agency, EPA (<https://www.epa.gov>), compile, mantenga actualizada y publique una lista de cada sustancia química que se fabrica o procesa, o importa, en los Estados Unidos. En Europa, REACH<sup>2</sup> es un reglamento de la UE que se adoptó con el fin de mejorar la protección de la salud humana y el medio ambiente frente a los riesgos derivados de las sustancias y mezclas químicas. La agencia europea de los productos químicos, European Chemical Agency, ECHA (<https://echa.europa.eu/es/>), contiene la información sobre las sustancias químicas que se fabrican e importan en la UE en cantidad superior a 1 t/año, y recoge sus propiedades peligrosas, su clasificación y etiquetado e información para un uso seguro de las mismas. Actualmente la base de datos de ECHA contiene más de 26.000 sustancias individuales registradas<sup>3</sup>.

Durante su uso, muchas de estas sustancias químicas se liberan al medio ambiente. A pesar de que su concentración en los cuerpos de agua puede ser muy pequeña, pg/L a µg/L, la exposición a largo plazo a algunos de estos compuestos, puede afectar a flora y fauna, a los seres humanos y los ecosistemas. Es prácticamente imposible, debido a limitaciones metodológicas, tecnológicas y económicas, conocer toda la información sobre todas las sustancias que se emplean industrialmente. No obstante, existe una gran cantidad de sustancias químicas que, aunque no tengan un efecto toxicológico ya demostrado; si se considera su composición y propiedades fisicoquímicas, así como estudios toxicológicos parciales ya realizados, se puede inferir que su presencia ambiental puede suponer un riesgo potencial. Estas sustancias se conocen como contaminantes de preocupación emergente (contaminants of emerging concern, CEC)

Así pues, se denominan contaminantes emergentes a una serie de sustancias químicas, de origen muy diverso, cuya presencia en el medio ambiente es motivo de preocupación creciente por sus posibles impactos negativos. El término emergente, o de preocupación emergente, se deriva de que su presencia y consecuencias en el medio ambiente han pasado inadvertidas hasta hace relativamente poco tiempo, debido en gran parte a que su concentración en el medio natural suele ser muy baja, y por tanto indetectable hasta que se desarrollaron suficientemente las técnicas analíticas.

La Directiva 2013/39/UE<sup>4</sup>, en su considerando 26, dice que los CEC se pueden definir como “contaminantes que en la actualidad no están incluidos en los programas de seguimiento sistemático de la Unión, pero que suponen un importante riesgo, lo cual exige su regulación, dependiendo de los efectos eco toxicológicos y toxicológicos, y de sus niveles en el medio acuático”.

La Red Norman ([www.norman-network.net](http://www.norman-network.net)) es una red europea de laboratorios de referencia, centros de investigación y organizaciones para el estudio de CEC que inició sus actividades en septiembre de 2005 con el apoyo financiero de la Comisión Europea y en 2009 se convirtió en permanente. La red Norman dispone de una base de datos con la lista fusionada de sustancias sospechosas que cuenta actualmente con más de 106.000 entradas<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> <https://www.epa.gov/tsca-inventory/about-tsca-chemical-substance-inventory> (acceso 21/04/2023)

<sup>2</sup> <https://echa.europa.eu/es/regulations/reach/understanding-reach> (acceso 21/04/2023)

<sup>3</sup> <https://echa.europa.eu/es/information-on-chemicals/registered-substances> (acceso 21/04/2023)

<sup>4</sup> Directiva 2013/39/UE por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas. <https://www.boe.es/doue/2013/226/L00001-00017.pdf>

<sup>5</sup> <https://www.norman-network.com/nds/susdat/susdatSearchShow.php> (acceso 21/04/2023)

## 1.2. Clasificación

Los CEC se suelen clasificar en función de sus usos, tal como se muestra en la Tabla 1.

CLASE	EJEMPLOS	OBSERVACIONES
Antibióticos	Tetraciclina, eritromicina	Fármacos utilizados contra infecciones bacterianas; inhiben/detienen el crecimiento bacteriano.
Antimicrobianos	Triclosán	Compuestos bioquímicos que matan o inhiben el crecimiento de microorganismos, incluidas bacterias y hongos.
Metabolitos de detergentes	Nonilfenoles, octilfenoles y alquilfenoles	Compuestos químicos formados durante la degradación primaria de los surfactantes alquilfenoles etoxilados y nonilfenoles etoxilados en el tratamiento de aguas residuales o en el medio ambiente. Los nonilfenoles y octilfenoles son más tóxicos que su precursor etoxilado.
Desinfectantes	Alcoholes, aldehídos y agentes oxidantes	agente químico usado para destruir, neutralizar o inhibir el crecimiento de microorganismos causantes de enfermedades.
Subproductos de desinfección	Cloroformo, nitrosodimetilamina	Sustancias químicas resultantes de la interacción de la materia orgánica en agua con agentes de desinfección, como el cloro.
Compuestos estrógenos	Estrona, estradiol, nonilfenol, bisfenol A	Sustancias naturales o sintéticas, que imitan o antagonizan la actividad fisiológica hormonal normal del estrógeno.
Retardantes de llama/fuego	Polibromo difenil éteres (PBDEs)	Materiales o recubrimientos que permiten inhibir o resistir la propagación del fuego.
Fragancias	Galaxolide	Sustancias químicas que liberan un dulce y agradable olor.
Repelentes de insectos	DEET (N,N-dietil-meta-toluamida)	Sustancias químicas aplicadas en la piel u otras superficies para repeler el contacto con insectos.
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)	Benzopireno, fluoranteno, naftaleno	Un largo grupo de sustancias químicas generalmente encontradas en el medio ambiente como resultado de una combustión incompleta de compuestos que contienen carbono como combustibles fósiles, madera o basura.
Productos de cuidado personal	Para-hidroxibenzoato	Sustancias químicas usadas en una gran variedad de productos personales, incluidos artículos de tocador y cosméticos.
Pesticidas o insecticidas	Permetrina, fenitrotión, Bacillus thuringiensis israelensis (B.t.i)	Sustancias químicas o agentes microbiológicos que matan, incapacitan o evitan que las plagas causen daños.
Productos farmacéuticos usados en psiquiatría	Fluoxetina, carbamazepina, difenhidramina	Sustancias químicas usadas en la prevención o tratamiento psicológico.
Plastificantes	Diocil ftalato, bisfenol A	Aditivos químicos que incrementan la plasticidad o fluidez de un material.
Hormonas reproductivas	Dihidrotestosterona, progesterona, estrona, estradiol	Grupo de sustancias químicas, generalmente esteroides, cuya función es estimular ciertas funciones reproductivas.
Disolventes	Etanol, keroseno	Soluciones químicas, otras aparte del agua, capaces de disolver sustancias.
Esteroides	Colesterol, coprostanol, estrona, progesterona	Un largo grupo de compuestos grasos solubles orgánicos con una estructura molecular característica que poseen muchas hormonas naturales y sintéticas.
Surfactantes	Lauril sulfato de sodio	Sustancias químicas que afectan a la superficie de un líquido.

Tabla 1. Clasificación de contaminantes emergentes. Fuente: adaptada de Raghav et al. (2013).

Cabe destacar cinco grupos muy relevantes de contaminantes emergentes:

1. Retardantes de llama bromados (BFR). Actúan removiendo los radicales H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> en la fase gaseosa de la llama, lo que disminuye la velocidad de la combustión, o incluso

previene el proceso de quemado, reduciendo la generación de calor y la producción de gases inflamables. Están presentes en gran variedad de productos comerciales, plásticos, aparatos electrónicos, pinturas, etc. Se han detectado en muestras humanas, animales y medioambientales, en áreas alejadas de las zonas de mayor producción y uso. Los posibles efectos adversos sobre la salud son neurotoxicidad, disrupción endocrina o cáncer. Ejemplos: Tetrabromo bisfenol A (TBBPA), Polibromodifeniléteres (PBDE), Hexabromociclododecano (HBCD)

2. Pesticidas (plaguicidas) y sus compuestos de degradación. Aunque los pesticidas se llevan estudiando desde hace mucho tiempo, y muchos de ellos están sometidos a regulación, sus productos de degradación han sido ignorados hasta hace poco tiempo, y algunos ya están pendientes de ser incluidos en las listas de contaminantes regulados. Son más ubicuos y en muchos casos más tóxicos que los compuestos originales. Ejemplos: derivados del Alacloro, Derivados del DCPA (ftalatos), Triazinas (atrazina, simazina, terbutilazina, etc.), Organoclorados (trifluralina, o,p-DDD, p,p-DDD, etc.).
3. Productos farmacéuticos. Se pueden citar 4 aplicaciones muy relevantes:
  - Antibióticos: su abuso presenta el riesgo de desarrollo de cepas bacterianas resistentes.
  - Medios de contraste en rayos X: son muy persistentes, no resultan eliminados en las plantas de tratamiento, y alcanzan fácilmente las aguas subterráneas por percolación a través de los suelos.
  - Citostáticos: los medicamentos citostáticos son sustancias citotóxicas que se utilizan específicamente para causar un daño celular, que no es selectivo para las células tumorales, sino que afecta a todas las células del organismo, resultando efectos tóxicos adversos de gran potencia, exhiben con frecuencia propiedades carcinogénicas, mutagénicas o embriogénicas.
  - Estrógenos: utilizados como anticonceptivos y para el tratamiento de desórdenes hormonales. Responsables en muchos casos de la aparición de fenómenos de feminización, hermafroditismo, y disminución de la fertilidad
4. Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS). Constituyen un grupo muy amplio de productos químicos que incluyen en su estructura química al menos un grupo tipo  $-\text{CF}_2-$  o  $-\text{CF}_3$ , que les confiere una gran estabilidad. Debido a sus propiedades específicas, como la resistencia a temperaturas extremas, la resistencia a la degradación y las características antiadherentes, se utilizan como componentes en muchas aplicaciones industriales, como retardantes de llama, recubrimientos de todo tipo de superficies, componentes electrónicos, productos de cuidado personal o envases de alimentos. Actualmente hay miles de sustancias con la estructura PFAS y muchas son ambientalmente persistentes, bioacumulativas y permanecen en el organismo de los seres humanos durante mucho tiempo. Aunque se fabrican y utilizan desde la década de 1940, la preocupación por los posibles efectos adversos en la salud humana aumentó a principios de la década de 2000 debido a la detección de ácido perfluorooctanoico (PFOA) y sulfonato de perfluorooctano (PFOS) en la sangre humana, que pueden causar efectos adversos en los sistemas reproductivos e inmunitarios, así como en el desarrollo, y en órganos como el hígado y los riñones, que fueron declarados sustancias prioritarias en la UE en 2013. Desde entonces, se han encontrado cientos de PFAS diferentes en el agua (incluida agua de lluvia), el suelo y el aire.
5. Microplásticos. Son partículas sintéticas de material plástico de tamaño menor de 5 milímetros, que se originan a partir de la degradación de productos plásticos de mayor

tamaño (microplásticos secundarios) y que se fabrican directamente (microplásticos primarios) como componentes de cosméticos, productos de limpieza, pinturas plásticas, cremas y detergentes. Su peligrosidad se deriva de que son muy persistentes, están ampliamente distribuidos en todo el mundo y en todas las matrices ambientales, y pueden contener compuestos tóxicos. Debido a su reducido tamaño (por abrasión pueden llegar a tamaños del orden de nanómetros), se pueden incorporar a la cadena trófica y pueden acumularse en distintos órganos y tejidos de los seres vivos.

### 1.3. Riesgo ambiental de los contaminantes emergentes

El riesgo ambiental de los contaminantes emergentes se deriva de su presencia prolongada, capacidad de concentración y su toxicidad.

a) La presencia prolongada de una sustancia en el medio ambiente depende fundamentalmente de dos factores, de su estabilidad química biológica y de su velocidad de incorporación al medio ambiente. O sea, una sustancia puede encontrarse en el medio ambiente porque es refractaria a la degradación química y biológica (por ejemplo, PFAS), o porque se introduce continuamente (por ejemplo, fármacos), o por ambas cosas (por ejemplo, microplásticos). Además, hay que considerar los fenómenos de transporte entre las distintas matrices ambientales en atmósfera ↔ agua ↔ suelo.

b) La capacidad de concentración está asociada a las propiedades físico-químicas de las sustancias, como solubilidad o hidrofobicidad. Así, muchas sustancias orgánicas se disuelven preferentemente en grasas, por lo que pueden acumularse en tejidos grasos de seres vivos.

Además, se debe tener en cuenta el fenómeno de biomagnificación, en virtud del cual los contaminantes van pasando a través de la cadena trófica desde los organismos más bajos en la cadena hasta los más altos, acumulándose a lo largo de la cadena. Un ejemplo muy conocido y documentado es el del diclorodifeniltricloroetano, conocido como DDT, que pasó de un uso masivo como insecticida con fines agrícolas y domésticos entre 1945 y 1972, en que fue prohibido por la USEPA, y posteriormente en el 2000 por la Convención de Estocolmo, aunque en 2006 la OMS lo reintrodujo para controlar la malaria (Mansouri et al., 2017). La razón de las restricciones y prohibiciones se deriva de la biomagnificación a través de la cadena trófica, como se muestra en la Figura 1.

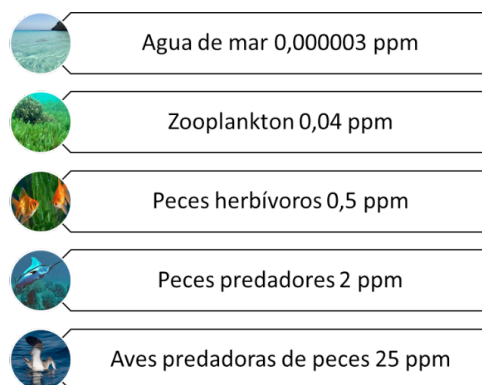


Figura 1. Concentración de DDT en distintos medios y organismos. Fuente: elaboración propia. Datos de Miller & Spoolman (2010).



c) La toxicidad de una sustancia es su capacidad para causar efectos nocivos en organismos vivos. Los efectos están relacionados con la dosis y la duración a la exposición, y pueden afectar de forma distinta a distintos tipos de organismos, e incluso a organismos de la misma especie. Además, la incidencia es distinta para los distintos grados de desarrollo de cada especie, siendo generalmente más acentuada para los estados de desarrollo embrionario y juvenil.

La toxicidad se puede presentar de forma inmediata o a medio y largo plazo, dependiendo de la dosis y de la intensidad del efecto tóxico. Para los CEC, dado que su concentración en las matrices ambientales es muy baja, los efectos se manifestarán a medio y largo plazo.

Para determinar la toxicidad de sustancias específicas se realizan ensayos para determinar sus efectos sobre distintos tipos de organismos, como bacterias, fitoplancton, zooplancton, plantas, cultivos in vitro y animales de laboratorio. La Comisión Europea ha establecido procedimientos para evaluar el riesgo ambiental de las sustancias (Leeuwen 2003<sup>6</sup>), indicando cómo calcular las concentraciones ambientales previstas, PEC (*Predicted Environmental Concentrations*) y las concentraciones previstas sin efecto, PNEC (*Predicted No-Effect-Concentrations*) y, cuando esto no sea posible, cómo realizar estimaciones cualitativas de las concentraciones ambientales y las concentraciones de efecto/sin efecto; además cómo llevar a cabo una evaluación PBT (persistencia, bioacumulación y toxicidad).

La PNEC es la concentración ambiental máxima que, con mucha probabilidad, no producirá efectos negativos. Para conocer la PNEC de una sustancia se debe hacer el estudio toxicológico sobre las distintas especies presentes en el medio en que se encuentra la sustancia, lo que en muchas ocasiones solo es posible de forma aproximada y con tiempos de experimentación limitados. Por otra parte, es muy difícil de evaluar los efectos sinérgicos de todos los CEC presentes y de sus potenciales subproductos de degradación. Estas interacciones pueden ser aditivas, o sea el efecto total es la suma de los efectos por separado, o puede haber una potenciación, o sea que el efecto adverso de una sustancia se potencia por la presencia de otra.

Una vez conocida la PNEC, para evaluar el riesgo ambiental de un contaminante se suele emplear el denominado cociente de riesgo, RQ (Risk Quotient), que se define como el cociente entre la concentración ambiental predicha o medida para el contaminante, PEC, y la concentración del mismo contaminante que no produce efectos, PNEC, o sea el cociente de riesgo es la relación entre la cantidad existente y la máxima permisible. Si RQ es inferior a 1, el riesgo ecológico que representa el microcontaminante es reducido, mientras que cuando los valores son iguales o superiores a 1, son probables los efectos adversos sobre los organismos expuestos.

A modo de ejemplo, Verlicchi et al (2012), realizaron una extensa revisión de la presencia de fármacos en aguas residuales y el riesgo medioambiental que supone la presencia de estos compuestos en el agua, recopilando los valores de toxicidad individuales de 67 fármacos para algas, daphnias y peces, y estimando el valor de RQ. Los resultados se muestran en la Figura 3, donde se puede observar que los 14 fármacos de mayor riesgo ambiental, RQ, de los contemplados en la revisión son: 7 antibióticos (eritromicina, ofloxacina, sulfametoxazol, claritromicina, amoxicilina, tetraciclina y azitromicina), 2 fármacos psiquiátricos (fluoxetina y diazepam), 2 analgésicos-antiinflamatorios (ibuprofeno y ácido mefenámico) y 3 reguladores de lípidos (ácido fenofibrato, fenofibrato y gemfibrozil).

<sup>6</sup> [file:///C:/Users/IUACA/Dropbox/PC/Downloads/technical%20guidance%20document%20on%20risk%20assessment%20in-LBNB20418ENC%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/IUACA/Dropbox/PC/Downloads/technical%20guidance%20document%20on%20risk%20assessment%20in-LBNB20418ENC%20(1).pdf)

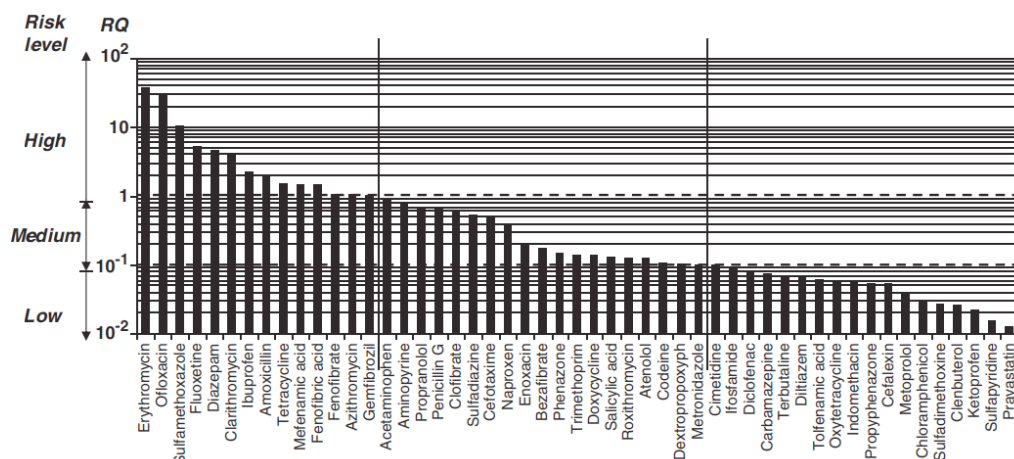


Figura 2. Riesgo ambiental, RQ, de una serie fármacos. Fuente: Verlicchi et al., 2012.

## 2. INCORPORACIÓN A LA NORMATIVA EUROPEA DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Por definición, las normas de calidad ambiental (NCA) de contaminantes de preocupación emergente (CEC) no están establecidas en la normativa. Cuando una determinada sustancia se califica como prioritaria y se establecen las NCA, deja de considerarse un CEC y sus límites de uso y presencia ambiental quedan normativamente establecidos. Los microcontaminantes se han ido incorporando progresivamente a la normativa de la UE.

- Directiva del Consejo 75/440/CEE<sup>7</sup>, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable. En esta Directiva de 1975 se pueden enmarcar los primeros antecedentes de una política comunitaria en materia medioambiental en la UE, ya que se incluyen las concentraciones máximas de una serie de microcontaminantes (MC), en las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.
- Directiva del Consejo 91/271/CEE<sup>8</sup>, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. En los criterios generales de calidad de aguas tratadas no se incluyen MC.
- La Directiva 98/83/CE<sup>9</sup> del Consejo, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano establece valores paramétricos máximos para una serie de MC orgánicos e inorgánicos.
- Directiva 2000/60/CE<sup>10</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo, denominada Directiva Marco del Agua, que tiene como objetivo fundamental el mantenimiento y preservación del buen estado de las aguas y ecosistemas acuáticos. La Directiva anuncia mayor protección y mejora del medio acuático, entre otras formas mediante medidas específicas de reducción progresiva de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias prioritarias, y sustancias peligrosas prioritarias. La lista de sustancias prioritarias que presenten un

<sup>7</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:I28006a>

<sup>8</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:I28008&from=ES>

<sup>9</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A31998L0083>

<sup>10</sup> <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj?locale=es>

- riesgo significativo para el medio acuático o a través de él se establecerá por la Comisión.
- Decisión 2455/2001/CE<sup>11</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo en la que se establece la primera lista de 33 sustancias (o grupos de sustancias) prioritarias (contaminante que presenta un riesgo significativo en la UE), calificándose 25 de ellas como “peligrosa prioritaria”.
- Reglamento CE no 1907/2006<sup>12</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), que es un procedimiento para evaluar y autorizar las condiciones de uso de las sustancias químicas de mayor preocupación ambiental, por el que se crea la Agencia Europea de Productos Químicos (ECHA), que debe identificar todas las propiedades y los riesgos de las sustancias.
- Directiva 2008/105/CE<sup>13</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo, que establece normas de calidad ambiental NCA, para las 33 sustancias prioritarias identificadas anteriormente y otros 8 contaminantes que ya estaban regulados en la UE. Las NCA establecen la concentración media anual y la concentración máxima admisible en aguas continentales.
- Directiva 2013/39/UE<sup>14</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo, que añade 12 nuevas sustancias prioritarias (6 de ellas calificadas como “peligrosa prioritaria”) y se dan las NCA para las mismas, indicando que las NCA deben tenerse en cuenta, por vez primera, en los planes hidrológicos de cuenca para el período 2015 a 2021. Así mismo prevé el establecimiento de una lista dinámica de observación de CEC respecto de las que deben recabarse datos de seguimiento a nivel de la Unión para verificar o no si las sustancias emergentes pueden calificarse como prioritarias.
- Decisión de Ejecución UE 2015/495<sup>15</sup> de la Comisión establece la primera lista de observación con 10 contaminantes o grupos de contaminantes emergentes.
- Decisión de Ejecución UE 2018/840<sup>16</sup> de la Comisión en la que se indica que, a lo largo de 2017, la Comisión analizó los datos obtenidos durante el primer año de seguimiento de las sustancias recogidas en la primera lista de observación. Sobre la base de este análisis, se establece la segunda lista de observación con 8 contaminantes o grupos de contaminantes emergentes.
- Decisión de ejecución (UE) 2020/1161<sup>17</sup> de la Comisión de 4 de agosto de 2020, establece la tercera lista de observación con 19 sustancias, a efectos de seguimiento a nivel de la UE en el ámbito de la política de aguas.
- Reglamento UE 2020/741<sup>18</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua, en el que los compuestos de interés emergente se consideran en el contexto del marco de gestión de riesgos. Así, uno de los requisitos a tener en cuenta en la evaluación de riesgos es cumplir las normas de calidad ambiental para sustancias prioritarias y otros contaminantes establecidos en la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Además, se podrán incorporar como requisitos adicionales para la evaluación del riesgo “a) metales pesados; b) plaguicidas; c) subproductos de la desinfección; d) productos farmacéuticos; e) otras sustancias de preocupación emergente, como los microcontaminantes y los microplásticos; f) resistencia

<sup>11</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32001D2455>

<sup>12</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20140410>

<sup>13</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32008L0105>

<sup>14</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex%3A32013L0039>

<sup>15</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32015D0495>

<sup>16</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A32018D0840>

<sup>17</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020D1161>

<sup>18</sup> [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?toc=OJ%3AL%3A2020%3A177%3ATOC&uri=uriser-v%3A0J.L\\_2020.177.01.0032.01.SPA](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?toc=OJ%3AL%3A2020%3A177%3ATOC&uri=uriser-v%3A0J.L_2020.177.01.0032.01.SPA)

a los antimicrobianos.”

- Directiva (UE) 2020/2184<sup>19</sup> del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, que incluye como nuevos parámetros los productos de la desinfección clorato y clorito, total de **ácidos** haloacéticos, total de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, bisfenol A y microcistina-LR. Además, el nonilfenol y el  $\beta$ -estradiol deben añadirse a la lista de observación que debe elaborar la Comisión de conformidad con la presente Directiva, a fin de atender a la creciente preocupación pública por los efectos en la salud humana de compuestos emergentes, como los compuestos con propiedades de alteración endocrina, los productos farmacéuticos y los microplásticos, por el uso de agua destinada al consumo humano, y de examinar los nuevos compuestos emergentes en la cadena de suministro.
- Decisión de Ejecución (UE) 2022/679 de la Comisión de 19 de enero de 2022 por la que se elabora una lista de observación de sustancias y compuestos que suscitan preocupación en relación con las aguas destinadas al consumo humano como se establece en la Directiva (UE) 2020/2184. Se establece un valor orientativo para los disruptores endocrinos  $\beta$ -estradiol y nonilfenol de 1 y 300 ng/L respectivamente.
- Decisión de Ejecución (UE) 2022/1307<sup>20</sup> de la Comisión de 22 de julio de 2022 por la que se establece la cuarta lista de observación de 26 sustancias a efectos de seguimiento a nivel de la Unión en el ámbito de la política de aguas.
- Revisión de Directiva 91/271/CEE. El pasado 26 de octubre de 2022, la Comisión Europea hizo pública una propuesta de modificación de la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, actualmente en vigor. La modificación incorpora la obligación de eliminar el espectro más amplio de microcontaminantes en las plantas depuradoras, tal como se desarrolla en el apartado siguiente.

### 3. REVISIÓN DE LA DIRECTIVA 91/271/CEE

La Comisión de la UE, teniendo en cuenta que hace más de 30 años que se promulgó la Directiva 91/271/CEE, y teniendo en cuenta los retos pendientes, como la necesidad de reducir el uso de gases de efecto invernadero y afrontar la problemática de microplásticos y otros microcontaminantes (MC), el pasado 26 de octubre de 2022, publicó una propuesta de revisión de la Directiva 91/271<sup>21</sup>, adaptándola a las normas más recientes. Con esta revisión se pretende:

- Reducir la contaminación, el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Mejorar la calidad del agua abordando la contaminación remanente en las aguas residuales urbanas.
- Mejorar el acceso al saneamiento, especialmente para los más vulnerables y marginados.
- Hacer que la industria pague para tratar los MC.
- Exigir a los países de la UE que supervisen los patógenos en las aguas residuales.
- Conducir a un sector del agua más circular.

En lo relativo al tratamiento, la nueva directiva actualiza los requisitos mínimos los tratamientos secundarios y terciarios, e introduce un artículo nuevo sobre tratamiento cuaternario, que

<sup>19</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020L2184&from=ES>

<sup>20</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A32022D1307>

<sup>21</sup> [https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-revised-urban-wastewater-treatment-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-revised-urban-wastewater-treatment-directive_en)

se define como “tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que elimina un amplio espectro de microcontaminantes de las aguas residuales urbanas”.

En la propuesta se indica que, para verificar la eficacia del tratamiento cuaternario respecto a la reducción de MC en las descargas de aguas residuales urbanas, es suficiente monitorear un conjunto limitado de MC representativos. Esta actuación ya se está practicando en Suiza<sup>22</sup>, que ha sido un país europeo pionero en incorporar a su normativa una ley de protección de aguas, cuyo objetivo es eliminar en un 80 %, todos los MC orgánicos que entran con las aguas residuales a las plantas de tratamiento.

Se propone un conjunto de 12 sustancias de referencia, que se muestran en la Tabla 2, que deben ser eliminadas en al menos un 80%. El porcentaje de eliminación se calculará para al menos seis sustancias. El número de sustancias de la categoría 1 será el doble del número de sustancias de la categoría 2. Si sólo se pueden medir menos de seis sustancias en concentración suficiente, la autoridad competente designará otras sustancias para calcular el porcentaje mínimo de eliminación, cuando sea necesario. Se utilizará la media de los porcentajes de eliminación de todas las sustancias utilizadas en el cálculo para evaluar si se ha alcanzado el porcentaje mínimo de eliminación requerido del 80 %.

	CATEGORÍA	SUSTANCIA	TIPO
1	Categoría 1 (sustancias que se pueden tratar muy fácilmente)	Amisulprida	fármaco antipsicótico
2		Carbamazepina	fármaco antiepiléptico
3		Citalopram	fármaco antidepresivo
4		Claritromicina	fármaco antibiótico
5		Diclofenaco	fármaco antiinflamatorio
6		Hidroclorotiazida	fármaco antihipertensivo
7		Metoprolol	fármaco antihipertensivo
8		Venlafaxina	fármaco antidepresivo
9	Categoría 2 (sustancias que se pueden eliminar fácilmente)	Benzotriazol	producto básico antiincrustante
10		Candesartán	fármaco antihipertensivo
11		Irbesartán	fármaco antihipertensivo
12		mezcla de 4-Metilbenzotriazol y 6-Metilbenzotriazol.	producto básico antiincrustante

Tabla 2. Lista de microcontaminantes que se propone inicialmente.

El tratamiento cuaternario se aplicará progresivamente a las grandes depuradoras de la UE: antes del 31 de diciembre de 2030 al 50% de las descargas de todas las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas que traten una carga igual o superior a 100.000 h.e., y a la totalidad de las descargas antes del 31 de diciembre de 2035. Asimismo, antes del 31 de diciembre de 2035 se aplicará al 50% de las descargas de todas las aglomeraciones 10.000 a 100.000 h.e. en zonas donde la concentración o acumulación de MC suponga un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, y a la totalidad de las descargas de estas aglomeraciones antes del 31 de diciembre de 2040.

<sup>22</sup> <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/AGENDA/Agenda%202019/20191105%20International%20research%20programs%20micropollutants/1.%20Presentation%20Micropollutants%20Switzerland%2C%20Christa%20McArdell.pdf>

En la propuesta se indica que, con este tratamiento, y otras medidas adicionales, para 2040, las nuevas reglas permitirán:

- Ahorrar casi 3 000 millones € al año en toda la UE.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en más del 60% en comparación con 1990.
- Disminuir la contaminación del agua en más de 365 mil toneladas.
- Reducir las emisiones de microplásticos en un 9 %.

En relación a la disminución de la contaminación del agua, hay que señalar que en las plantas de tratamiento de aguas residuales actuales diseñadas para cumplir con los requisitos de la Directiva 91/271, en ningún caso se pretende alcanzar una calidad en el agua tratada similar a la de las aguas naturales, o sea eliminar totalmente todos los contaminantes, sino que lo que se pretende es alcanzar un nivel de calidad “razonable” para el que el impacto de su vertido pueda ser absorbido por los cuerpos de aguas receptores (ríos, lagos, aguas costeras). La realidad actual es que muchas masas de agua en la UE están contaminadas por materia orgánica, sales o nutrientes. Si bien parte de esa contaminación procede de prácticas agrícolas o ganaderas deficientemente gestionadas, otra parte procede de los vertidos de aguas residuales depuradas.

En efecto, las aguas residuales depuradas todavía contienen sólidos en suspensión (SS), materia orgánica biodegradable medida como demanda biológica de oxígeno (DBO5), materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) metales pesados, nutrientes medidos como nitrógeno total ( $N_{total}$ ) y fósforo total ( $P_{total}$ ), sales disueltas, microcontaminantes orgánicos y microorganismos. Es posible realizar una estimación de las cantidades totales de sólidos en suspensión, materia orgánica y nutrientes, que se pueden verter en España cada año a los cuerpos de agua receptores de las aguas depuradas, tanto en zonas sensibles como en zonas normales, si el agua depurada se ajusta a los límites de calidad establecidos en la normativa. Los valores se presentan en la Tabla 3 y se refieren al año 2017.

VALORES ESTIMADOS EN AGUAS TRATADAS			POBLACIÓN AFECTADA (MILLONES DE HABITANTES)	VOLUMEN ANUAL DEPURADO EN 2017(hm <sup>3</sup> )	ESTIMACIÓN DE CARGA ANUAL VERTIDA (TONELADAS)
Zonas normales	Parámetro	Concentración (mg/L)	30,0	3.175	
	DBO <sub>5</sub>	25			79.375
	DQO	125			396.875
	SS	35 (más de 10.000 h.e.)			111.125
	P <sub>total</sub>	5 (estimado)			15.875
	N <sub>total</sub>	25 (estimado)			79.375
Zonas sensibles	DBO <sub>5</sub>	25	16,7	1.760	44.000
	DQO	125			220.000
	SS	35 (más de 10.000 he) 60 (de 2.000 a 10.000 h.e.)			61.600
	P <sub>total</sub>	2 (10.000-100.000 he) 1 (>100.000 h.e.)			2.640
	N <sub>total</sub>	15 (10.000-100.000 h.e.) 10 (>100.000 h.e.)			21.120

Tabla 3. Valores estimados de sólidos en suspensión, materia orgánica y nutrientes que se pueden verter anualmente en España en zonas normales y zonas sensibles, considerando que la calidad del agua depurada se ajusta a los límites establecidos en la directiva 91/271 CEE. Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior se puede deducir que, cada año, en España, pueden ir a los cuerpos de agua receptores un total de 124.000 t de DBO<sub>5</sub>, 617.000 t de DQO, 173.000 t de SS, 18.500 t de P<sub>total</sub>, 100.000 t de N<sub>total</sub>, además de sales, metales pesados, microcontaminantes orgánicos y una gran cantidad y variedad de microorganismos, presentes en las aguas residuales depuradas, y todo ello cumpliendo estrictamente con la normativa presente.

Un estudio más amplio y detallado para toda la UE se incluye en el documento de trabajo sobre la evaluación de impacto que acompaña a la propuesta de revisión de la directiva<sup>23</sup>, donde se analiza, entre otros aspectos, la contaminación remanente de fuentes urbanas. En el análisis se indica que cuando se adoptó la Directiva 91/271, se puso en énfasis en la contaminación derivada de las fuentes centralizadas de grandes ciudades, y menos atención a las aguas pluviales, las aglomeraciones más pequeñas y los sistemas individuales, para los cuales los requisitos se mantuvieron más genéricos. La aplicación de la Directiva ha llevado a que las emisiones de estas fuentes se han vuelto progresivamente equivalentes a las emisiones de las instalaciones centralizadas. En efecto, La carga inicial total generada asciende a 708,8 millone de h.e. De ellos, 517 millones de eh se envían a plantas depuradoras centralizadas y 191,8 millones de eh no se recogen y por tanto no se tratan en instalaciones centralizadas (49,3 millones de eh se generan en pequeñas aglomeraciones, 16,5 millones en instalaciones individualizadas y 126 millones provienen de desbordamiento de aguas pluviales y escorrentía urbana.

<sup>23</sup>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022SC0541>

La carga remanente se puede desglosar en microcontaminantes, E. Coli, fósforo, nitrógeno y demanda biológica de oxígeno, como se muestra en la Figura 3.

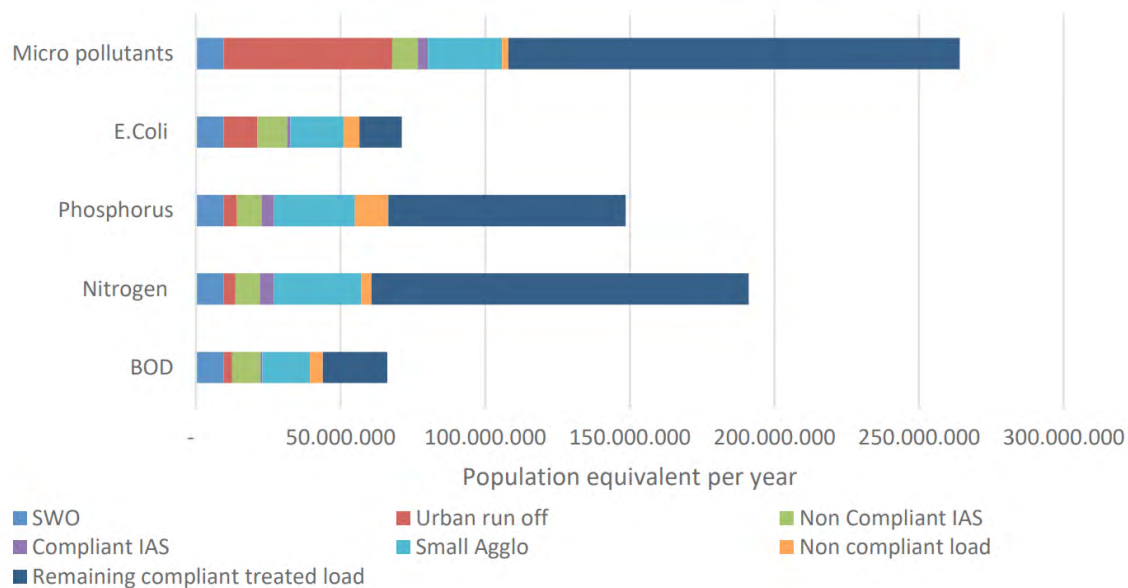


Figura 3. Cargas restantes de fuentes urbanas (h.e./año). Fuente: JRC (2022).

Según el informe de impacto, parte de esta contaminación podría evitarse, pero, incluso con el escenario máximo factible, existen límites a lo que técnicamente se puede lograr, razonablemente, con las técnicas actuales. En la Tabla 4 se detalla el origen de cada tipo de contaminación remanente y el porcentaje de carga “tratable”.

	DBO (h.e.)	NITRÓGENO (h.e.)	FÓSFORO (h.e.)	E. COLI (h.e.)	MICRO CONTAMINANTES (h.e.)
(1) Carga restante de 191,8 millones de h.e. de SWO/escorrentía urbana, pequeña aglomeración y IAS	39.395.928	57.159.194	54.993.361	51.224.149	105.766.283
(2) Carga restante de 517 millones de h.e. enviados a instalaciones centralizadas después del tratamiento	26.752.894	133.967.530	93.607.423	19.886.613	158.360.974
(3) Carga restante total (1) + (2)	66.148.823	191.126.725	148.600.784	71.110.762	264.127.257
(4) Carga restante si se aplica el tratamiento máximo factible	34.239.042	88.219.608	47.658.013	5.736.591	130.837.224
(5) % de la carga restante que es “tratable” [(3)-(4)]/(3)	48,24%	53,84%	67,93%	91,93%	50,46%

Tabla 4. Cargas remanentes enviadas al medio ambiente en la UE y carga restante si se aplicara el tratamiento máximo factible. Fuente: JCR (2022).



## 4. PROCESOS PARA ELIMINAR CONTAMINANTES EMERGENTES

Las aguas residuales depuradas por procedimientos convencionales, así como los lodos de depuradora, contienen todavía una gran cantidad de contaminantes, incluidos MC de preocupación emergente, CEC, en concentraciones variables, en función de sus propiedades físico-químicas y su mayor o menor biodegradabilidad. Por ejemplo, muchos productos farmacéuticos están diseñados para ser persistentes y lipofílicos, de modo que puedan retener su estructura química en el organismo el tiempo suficiente para realizar su trabajo terapéutico (Loganathan et al., 2009), por lo que se encontrarán tanto en las aguas tratadas como en los lodos. Además, tanto los fármacos como otros grupos de CEC, su uso es continuo y creciente, por lo que no es necesario que sean persistentes para estar siempre presentes en todas las matrices acuáticas (Daughton & Ternes, 1999).

Las depuradoras convencionales no están diseñadas para la eliminación de todos los MC presentes en bajas concentraciones (ng/L- $\mu$ g/L). Deben buscarse por tanto tecnologías complementarias para cumplir este objetivo. La aplicación de estas tecnologías a instalaciones a gran escala dependerá de su grado de desarrollo, que debe ser suficiente para su implementación a escala real, y de los costes e impactos ambientales asociados a su implementación.

Para eliminar los contaminantes emergentes del agua residual depurada caben 2 opciones. La primera es la separación física mediante procesos de membranas o de adsorción. La segunda es la transformación química a sustancias no tóxicas, lo que se realiza mediante procesos de oxidación avanzada. En la Figura 4 se indican una serie de tecnologías que se pueden aplicar para cada una de las 2 opciones.

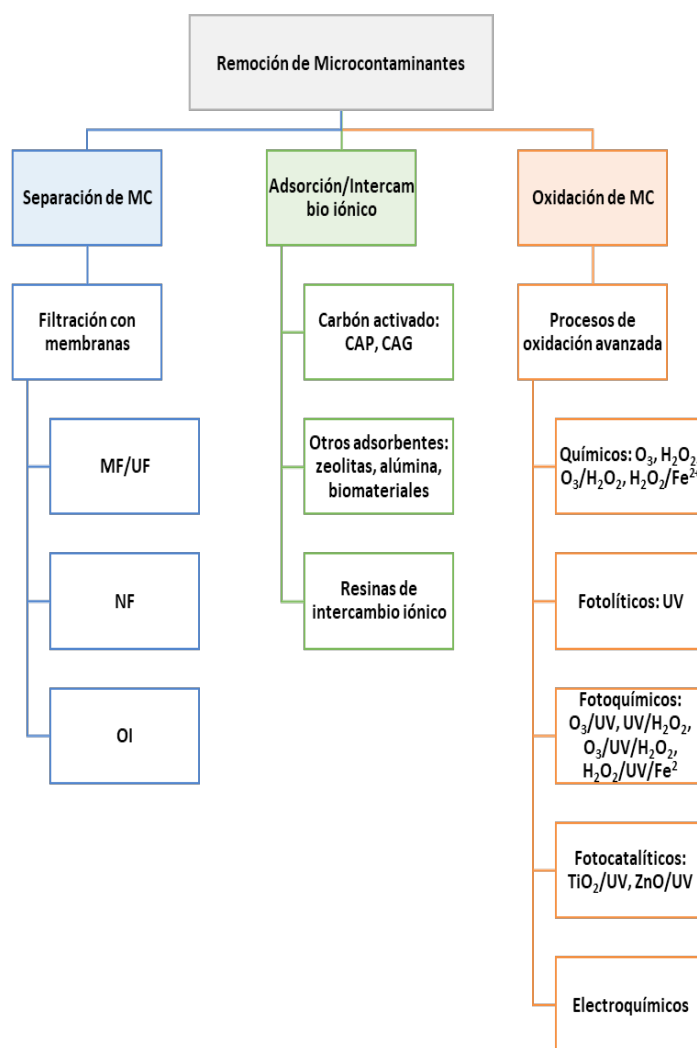


Figura 4. Tratamientos posibles para eliminar microcontaminantes. Fuente: elaboración propia.

En la literatura científica se pueden encontrar muchas investigaciones sobre los distintos procesos incluidos en la Figura 2, a diferentes escalas de experimentación. Cabe destacar tres amplios trabajos muy interesantes:

- Baresel et al. (2019), presentan los resultados de un interesante estudio holístico de 3 años de duración sobre varias alternativas de tratamiento eficaces para la eliminación de varios MC, considerando los costos de inversión y operación, los impactos ambientales y aplicación futura para las EDAR suecas. La Figura 5 ilustra de forma resumida los resultados del estudio.

**Relevant treatment systems for Swedish wastewater treatment plants**

Treatment of	Powdered				
	Ozonation	Biofilter with granulated activated carbon (GAC)	activated carbon (PAC) & Ultrafiltration (UF)	Ozonation & Biofilter with GAC	Ultrafiltration (UF) & Biofilter with GAC
Pharmaceuticals	■■■■	■■■■	■■■■	■■■■	■■■■
Antibiotic resistance	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Disinfection	■■	■■	■■	■■	■■
Estrogenic effect	■■■■	■	■	■■■■	■
Microplastics	■	■■	■■■■	■■	■■■■
PFAS/PFOS	■■	■■■■	■■■■	■■■■	■■■■
<b>Environmental impact</b>					
- Energy	■■	■■	■	■■	■
- Chemicals	■■■■	■■■■	■	■■■■	■
Costs (€/m <sup>3</sup> )	0.015 - 0.035	0.02 - 0.08	0.12 - 0.16	0.04 - 0.08	0.06 - 0.19
Main cost items	Ozone dose contact time	Filter change	Membrane PAC dosing	Ozone dose Filter change	Membrane Filter change
Negative side effect	Increased toxicity		PAC slurry		

The table is a simplified summary of the reports detailed content.

- - good removal effect/no environmental impact
- - moderate removal effect/low environmental impact
- - some removal effect/some environmental impact
- - no removal effect/high environmental impact

Figura 5. Características generales y comparación de tecnologías de tratamiento relevantes para la eliminación de MC. Fuente: Baresel et al. (2019)

- Ahmed et al. (2017), en un trabajo de revisión ampliamente citado, comparan los rendimientos de eliminación de CEC para distintas tecnologías empleadas de forma individual o combinada. Las principales conclusiones son:
  - o Para la eliminación de pesticidas, betabloqueantes y productos farmacéuticos han resultado ser los mejores los métodos de oxidación química como la ozonización/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la fotólisis UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y los procesos foto-Fenton.
  - o Para la eliminación de disruptores endocrinos son muy efectivos los procesos de ozonización y fotocatalisis UV.
  - o El proceso Fenton es el menos efectivo entre todos los tipos de tecnologías de oxidación avanzada.
  - o Los sistemas híbridos como MBR seguidos de ósmosis inversa, nanofiltración o ultrafiltración son los mejores para la eliminación de disruptores endocrinos y productos farmacéuticos, pero no son tan efectivos para la eliminación de pesticidas.
  - o La ozonización seguida de un sistema híbrido de carbón activado biológico es eficaz en la eliminación de pesticidas, bloqueadores beta y productos farmacéuticos.
  - o La ozonización seguida de un sistema híbrido de ultrasonido puede eliminar hasta el 100 % de ciertos productos farmacéuticos. Los sistemas híbridos que usan ultrafiltración y carbón activado seguido de un proceso de ultrasonido pueden ser un mejor proceso para eliminar una amplia gama de CEC, pero probablemente no serán rentables. A modo de ejemplo, la Figura 6 muestra las eficiencias de eliminación para distintos grupos de CEC que se alcanzan con distintas tecnologías de oxidación avanzada y la Figura 7 las eficiencias de eliminación logradas con distintos procesos combinados que incluyen membranas.

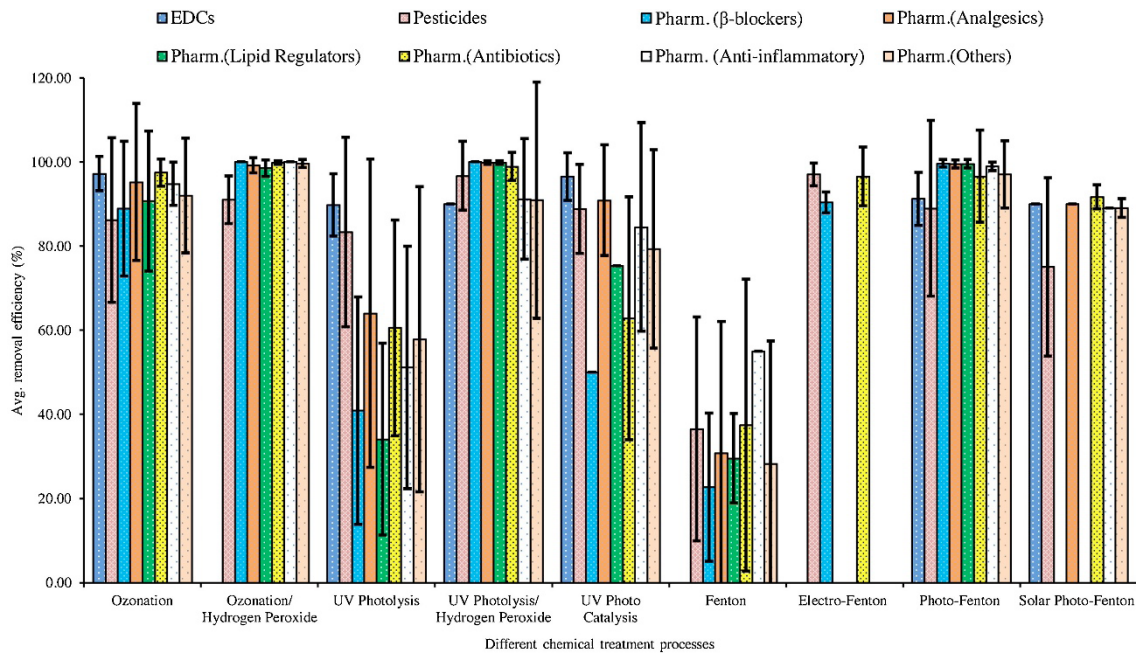


Figura 6. Eficiencias de eliminación de una serie de CEC logradas por distintos procesos de oxidación avanzada. Fuente: Ahmed et al. (2017).



Figura 7. Eficiencias de eliminación de CEC logradas con distintos procesos combinados que incluyen membranas. Fuente: Ahmed et al. (2017).

- Yangali-Quintanilla, et al. (2010), realizaron ensayos a escala piloto comparando rechazos de compuestos con distintas cargas y peso molecular en membranas de NF y OI. La Figura 8 muestra la influencia de tamaño y carga en remociones empleando membranas

de NF y las Figuras 9 y 10 comparan la remoción entre membranas de NF y OI para compuestos neutros y compuestos iónicos respectivamente.

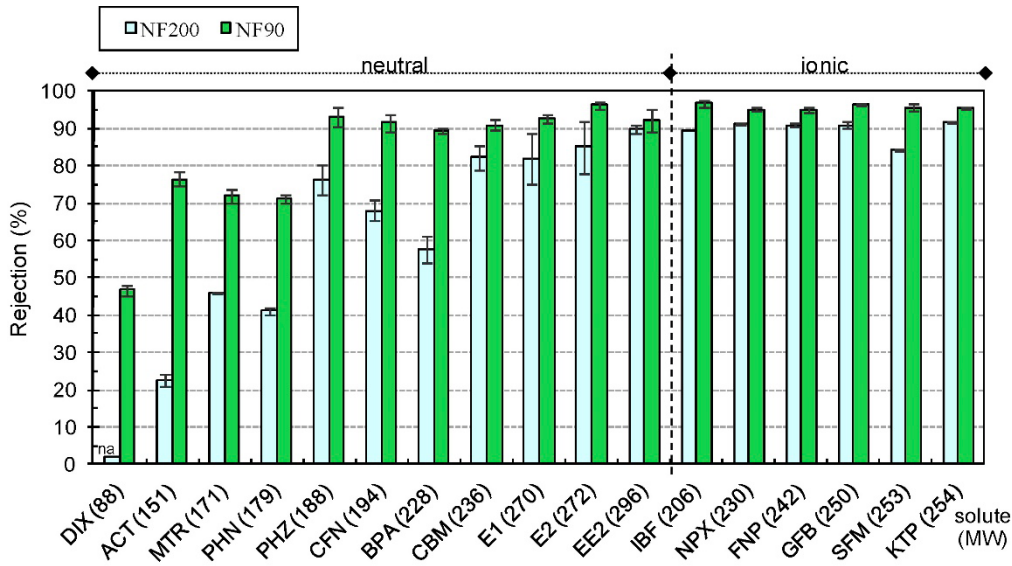


Figura 8. Influencia del tamaño y la carga en las remociones (promedio de membrana limpia y sucia) de compuestos orgánicos por NF-200 y NF-90 (na no disponible). Fuente: Yangali-Quintanilla, et al. (2010).

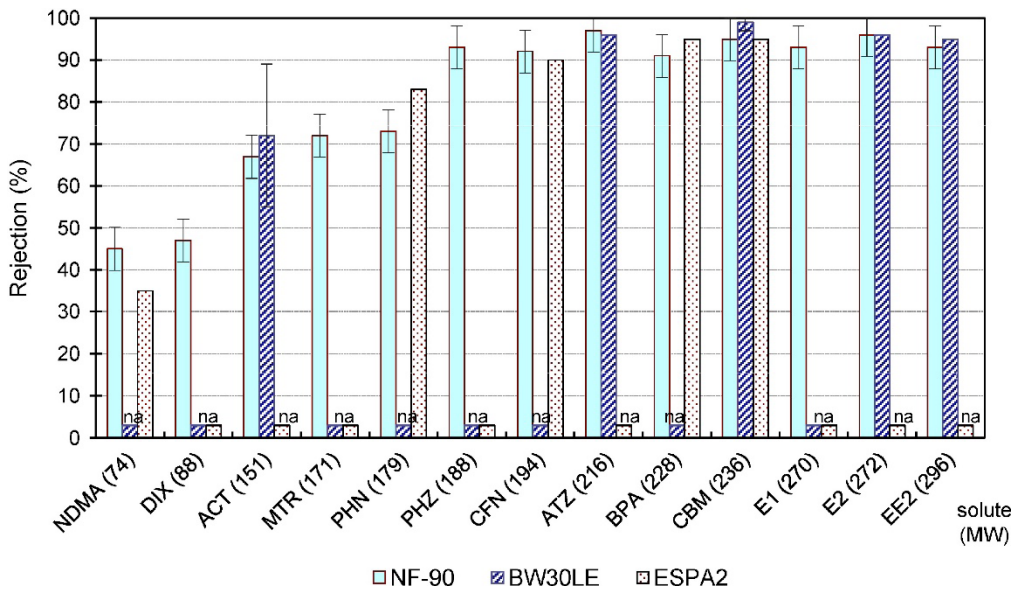


Figura 9. Comparación de rechazos de compuestos neutros por NF y RO (na no está disponible). Fuente: Yangali-Quintanilla, et al. (2010)

Estos autores concluyen que la NF es una barrera efectiva para contaminantes orgánicos y su rendimiento de eliminación es comparable con OI. Solo unos pocos contaminantes orgánicos pequeños no son bien eliminados por la NF. Además, la NF es menos costosa que la OI en costos de capital y costos de operación y mantenimiento.

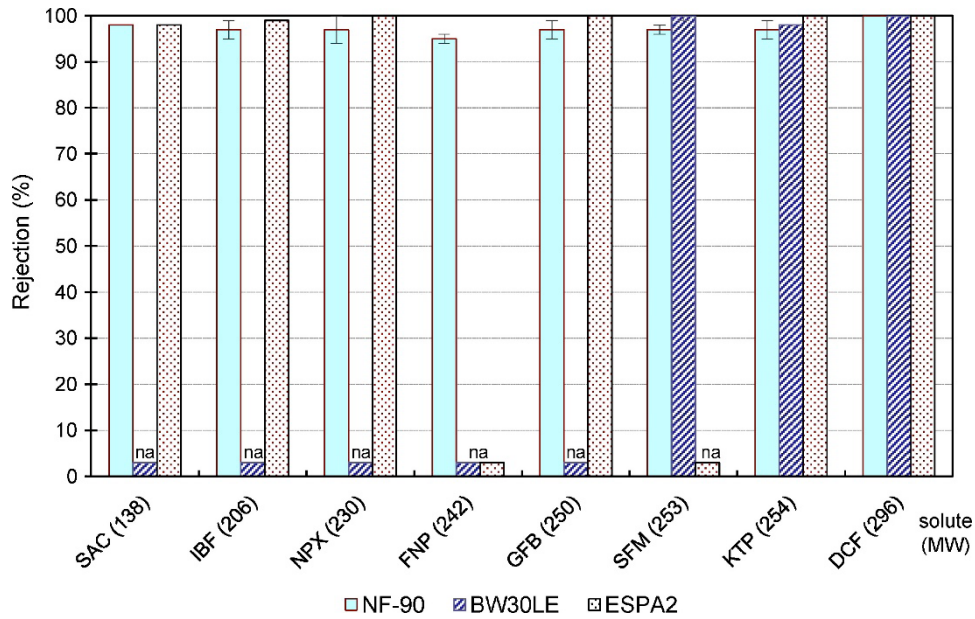


Figura 10. Comparación de rechazos de compuestos iónicos por NF y RO (na no está disponible). Fuente: Yangali-Quintanilla, et al. (2010).

Como se puede deducir, son muchos los procesos y combinaciones de procesos que se pueden emplear para reducir o eliminar los CEC de las aguas depuradas mediante un tratamiento cuaternario. La selección se debe realizar sobre la base las tecnologías más apropiadas para cada caso, y teniendo en cuenta los conocimientos derivados de su aplicación a escala real o bien a escala piloto con aguas reales.

## 5. TECNOLOGÍAS CONSOLIDADAS A GRAN ESCALA PARA EL TRATAMIENTO CUATERNARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las tecnologías consolidadas ya aplicadas a gran escala son la ozonización y carbón activado, de forma individual o combinada, y las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa.

### 5.1. Ozonización

En general, los procesos de oxidación avanzada (POA) pueden transformar los MC y el resto de materia orgánica presentes en agua en otros compuestos intermedios, que pueden ser más o menos nocivos, o alcanzar la mineralización completa a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e iones inorgánicos. El propio agente oxidante y la formación de radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ), que tienen un elevado potencial de oxidación (2.8 voltios) son capaces de oxidar gran variedad de compuestos presentes en las aguas, aunque tienen muy baja selectividad.

El ozono ( $\text{O}_3$ ) es un gas muy reactivo con alto potencial oxidante. Su potencial redox es más elevado que la mayoría de oxidantes usados habitualmente (2,07 eV) y, además, en el proceso de ozonización en medios acuosos, la presencia de materia orgánica favorece la formación de radicales  $\text{OH}\cdot$ .

El ozono es capaz de reaccionar con enlaces dobles o triples como  $C\equiv C$ ,  $C=N$ ,  $C=C$  o  $N=N$ . Estas reacciones forman compuestos que son inestables y se rompen para formar compuestos más pequeños, y generan radicales  $OH\cdot$ ; también puede reaccionar mediante la adición electrofílica del sustrato para formar radicales reactivos ( $R + O_3 \rightarrow R+OOO-$ ), o puede reaccionar por inserción, lo que lleva a la prolongación de la cadena ( $RH + O_3 \rightarrow HR+OOO- \rightarrow ROOOH$ ). Para facilitar la formación de más radicales y conseguir una reacción más rápida, se puede añadir una pequeña dosis de peróxido de hidrógeno (M' Arimi, et al., 2020).

Las fuertes propiedades oxidativas del ozono y de los radicales hidroxilo producidos espontáneamente durante su descomposición, determinan que la ozonización degrade eficientemente la mayoría de los microcontaminantes presentes en las aguas residuales depuradas aplicando una concentración de 2–8 mg  $O_3/L$ , que depende de la presencia de materia orgánica y del tipo de compuestos. Hay sustancias que debido a su estructura (como anilinas, olefinas o aminas) muestran una alta reactividad con el ozono (Lee & Von Gunten, 2012). Otras sustancias son menos reactivas con el ozono, pero muestran alta reactividad con los radicales  $OH\cdot$ . En general, parte de la materia orgánica presente, que as su vez puede contener nitrito, reaccionan rápidamente con el ozono, contribuyendo a la demanda total de ozono con 0,2–0,6 mg  $O_3/mg C$  y 3,4 mg  $O_3/mg N-NO_2$  respectivamente (Wert et al., 2009). Por lo tanto, para tener suficiente ozono para la oxidación de MC y asegurar una exposición de ozono suficiente, la dosificación de ozono se debe regular para mantener una concentración de ozono residual a la salida del reactor de contacto.

Una desventaja de este proceso es la posible formación de subproductos reactivos impredecibles debido a la oxidación parcial de los compuestos y la reacción con los componentes de la matriz. Por ejemplo, se pueden formar subproductos de oxidación tóxicos no deseados, como nitrosaminas, bromatos o formaldehído, lo que podría aumentar la toxicidad de las aguas tratadas con ozono respecto a las no ozonizadas.

## 5.2. Carbón activado

La adsorción es una de las técnicas más eficientes para separar contaminantes en baja concentración. Tiene la ventaja de no precisar aditivos químicos y de que existe la posibilidad de restauración, reutilización y reciclaje del adsorbente. Su operación es muy sencilla, es fácil de incorporar en línea con otros procesos y no se ve afectada por los productos químicos tóxicos. Por todo ello la tecnología de adsorción se considera uno de los métodos de tratamiento de aguas en general más efectivos y confiables.

Wang & Guo (2020), describen los mecanismos de adsorción: La cinética de transferencia de masa por adsorción incluye tres etapas, como se muestra en la Figura 11. La primera etapa es la difusión externa, en la que el adsorbato se transfiere a través de la película líquida que rodea al adsorbente. La diferencia de concentraciones entre el seno de la solución y la superficie del adsorbente es la fuerza motriz de la difusión externa. La segunda etapa es la difusión interna, o sea la difusión del adsorbato dentro de los poros del adsorbente. La tercera etapa es la adsorción del adsorbato en los sitios activos del adsorbente.”

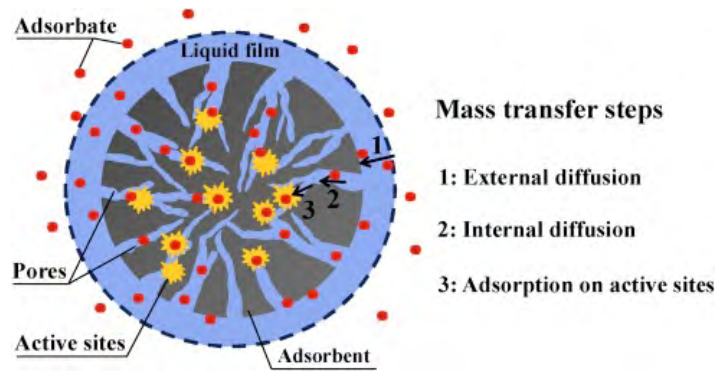


Figura 11. Etapas de transferencia de masa por adsorción. Fuente: Wang & Guo, 2020.

Como consecuencia del mecanismo de adsorción, la adsorción de MC específicos en un determinado tipo de adsorbente, estará influenciada por las características del adsorbente, la matriz de agua y las condiciones de operación, tal como se representa en la Figura 12.

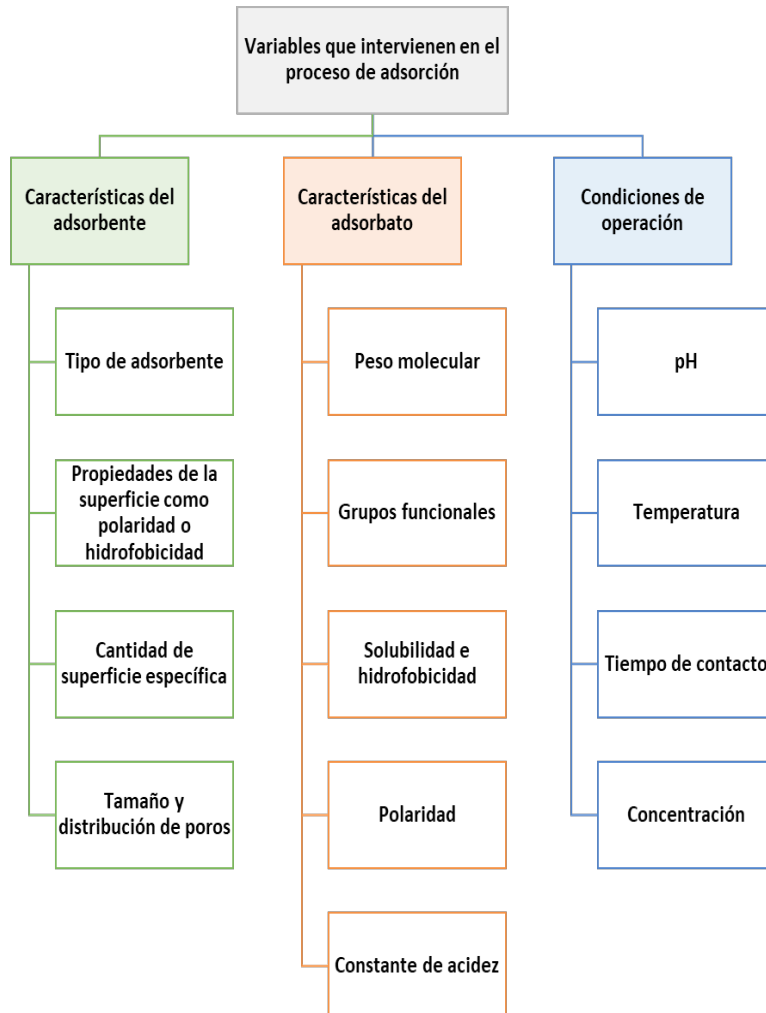


Figura 12. Factores que influyen en el proceso de adsorción. Fuente: elaboración propia.



Entre los posibles adsorbentes, el carbón activado es ampliamente empleado debido a sus características superficiales específicas, como una alta área superficial y porosidad. Se usa ampliamente en el tratamiento de aguas. Puede eliminar una amplia variedad de compuestos como pesticidas, compuestos de alto peso molecular, alcoholes, surfactantes, compuestos fenólicos, etc. En general la adsorción de MC dependerá de las propiedades físico-químicas de los compuestos, con tendencia a adsorber compuestos orgánicos hidrofóbicos (coeficiente de partición octanol-agua,  $K_{ow}$ , elevados), y estará influenciada por las características del carbón, la matriz de agua y las condiciones de operación.

Existen distintos tipos de carbón activado en función de su presentación: carbón activado en polvo (PAC), carbón activado granular (GAC), pellets de carbón activado, etc. El empleo de cada uno de ellos depende de su aplicación específica.

### **5.3. Plantas a gran escala con ozono y/o carbón activado**

En 2016 entró en vigor una nueva ley en Suiza para protección del agua y medioambiente con el objetivo de reducir la descarga de MC de las plantas de tratamiento de aguas residuales. De forma similar a la revisión propuesta para Directiva 91/271, la ley suiza determina que en las EDAR grandes (> 80.000 h.e.) y las que vierten en aguas que sirven como recurso para agua potable o que ya están contaminadas con aguas residuales, deben mejorar la calidad del agua tratada mediante un tratamiento avanzado para la reducción de MC (McArdell & Meier, 2019).

Bourgin et al. (2018), publicaron información muy interesante sobre la EDAR de Neugut (105.000 h.e.), que fue la primera en Suiza en implementar una ozonización a gran escala. Se realizó el seguimiento de 550 sustancias. Tras aplicar diferentes dosis específicas de ozono, para esta planta se recomienda una dosis específica de ozono de 0,55 g  $O_3$  /g DOC, que asegura una reducción media de las 12 sustancias indicadoras seleccionadas en  $\geq 80\%$  durante todo el tratamiento. Después de la ozonización, se ensayó un postratamiento biológico adicional para eliminar los posibles efectos ecotoxicológicos negativos generados durante la ozonización causados por los productos de transformación y subproductos de oxidación.

En la Figura 13 se muestra la ubicación de las depuradoras suizas que tienen implantados o proyectados procesos de ozonización y/o carbón activado, o procesos combinados de ambos).

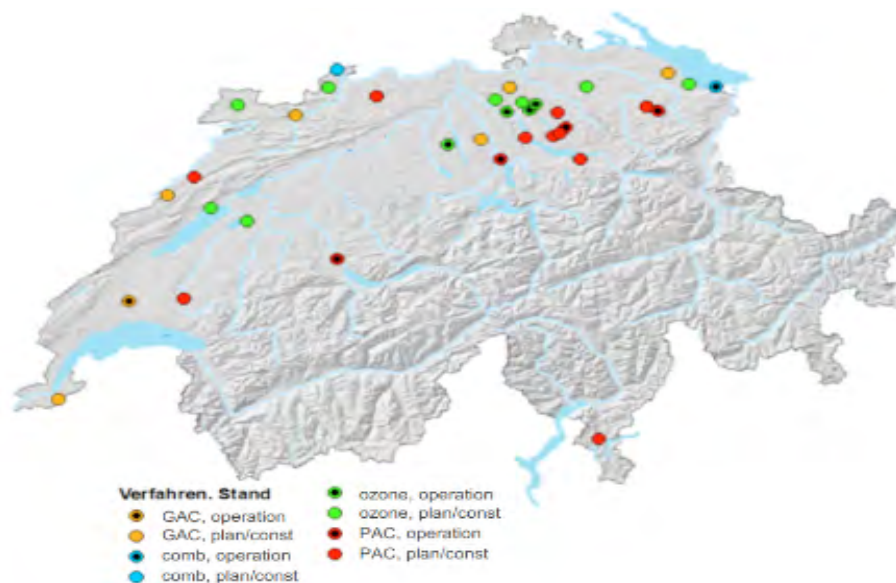


Figura 13. Situación en agosto de 2019 de las depuradoras suizas con carbón activado granular (GAC), carbón activado en polvo (PAC), ozono o procesos combinados, en operación o en planificación/contrucción. Fuente: McArdell & Meier (2019).

Hay otras plantas ya implantadas o proyectadas en Alemania, Francia y Austria<sup>24</sup> que también incorporan estas tecnologías.

#### 5.4. Plantas a gran escala con tratamiento con membranas

Como es bien conocido el tratamiento de OI es ampliamente utilizado para desalinizar aguas salinas naturales y agua de mar para obtener agua dulce, y la NF se emplea en eliminación de dureza y otras aplicaciones industriales. En el caso de la aplicación a aguas residuales las características del agua a tratar son distintas ya que la salinidad será baja o moderada y la presencia de materia orgánica puede ser importante. Por tanto, el consumo de energía será más reducido que en las operaciones de desalinización, pero el riesgo de ensuciamiento de las membranas será mucho más elevado.

Entre las tecnologías de membrana, las más comúnmente implementadas a gran escala son los de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). Las membranas de estos procesos eliminan contaminantes orgánicos disueltos, sólidos inorgánicos disueltos, iones inorgánicos y muchos microorganismos patógenos proporcionando una barrera de desinfección, haciéndolos especialmente atractivos para la recuperación de agua como potable. Se han implementado trenes de tratamiento que incluyen membranas de NF/OI en esquemas de reutilización como potable en California, Australia, y Singapur.

- Water Factory 21 (California). Desde 2008 en el Condado de Orange (Orange County Water District), en el Sur de California hay en marcha un sistema de reposición de aguas subterráneas a partir de aguas residuales que se someten al sistema avanzado de purificación de agua, que es inyectada en el acuífero de donde se extrae el agua potable, como barrera de intrusión marina para su reutilización potable. El proceso de purificación produce agua de alta calidad que supera los estándares del estado de California y los estándares federales de agua potable en USA. En funcionamiento desde enero de 2008,

<sup>24</sup> <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1kuJEhBhOAsExUnnoPtyVmlk-72Q&ll=49.06123226510303%2C10.208245239843801&z=6>

y desde entonces en expansión hasta 2015. El sistema de tratamiento puede producir 378.000 m<sup>3</sup>/día, y se proyecta una capacidad última de 492.000 m<sup>3</sup>/día. Se estima que este proceso contribuye con alrededor del 25 por ciento del suministro de agua dulce en la cuenca, y disminuye la dependencia de agua importada costosa desde el norte de California y el río Colorado.

- **NEWater (Singapur).** En Singapur, la agencia nacional del agua de Singapur introdujo en 2003 el proyecto NEWater (Singapore Water Reclamation), un proceso de barreras múltiples estrictas que supera los estándares de agua potable. Cuenta actualmente con 5 plantas con tratamiento avanzado con una capacidad total combinada de 462.000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada. Parte de esta agua se mezcla en los embalses con el agua que se emplea como agua potable. NEWater puede satisfacer actualmente el 30% de la demanda total de agua de Singapur, y se prevé para que pueda satisfacer hasta el 55% de su demanda en 2060.
- **Perth (Australia)-Tratamiento avanzado UF+OI+UV- Reutilización indirecta.** En Perth, Australia un primer proyecto de reposición de aguas subterráneas a gran escala para asegurar el suministro de agua potable de la ciudad contra la disminución de la precipitación provocada por el cambio climático. El tratamiento incorpora la triple barrera de membranas y desinfección. El agua tratada recarga un acuífero profundo (120-220 m) confinado, que se usará algunos años más tarde. La capacidad inicial es de 14 hm<sup>3</sup>/año, y se podrá ampliar a 28 hm<sup>3</sup>/año por lo que se convertirá en la próxima fuente de agua independiente del clima (ciclo del agua) para la creciente población de Perth, que también cuenta con dos plantas desaladoras de agua marina a gran escala. Este proyecto podrá suministrar hasta el 20% de las necesidades de agua potable a más de dos millones de personas.

En la Figura 14 se muestran los diagramas de bloques de los procesos comparativos para las instalaciones descritas.

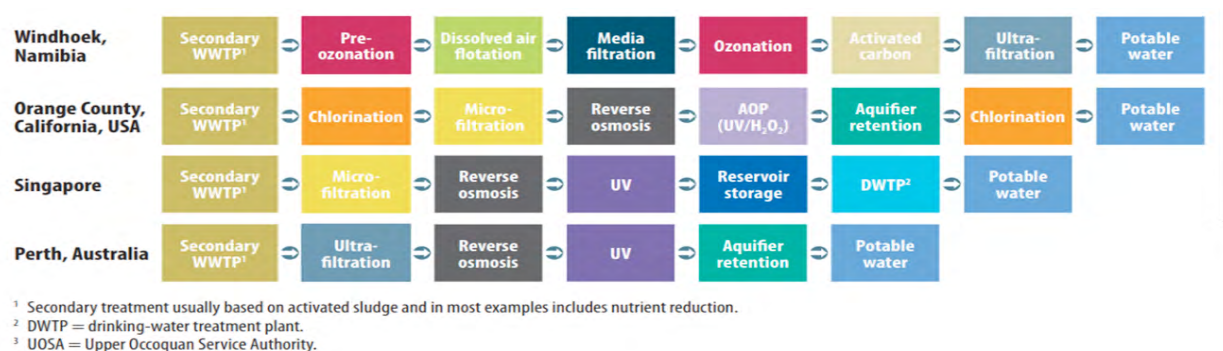


Figura 14. Comparación entre tratamientos apropiados para reutilización directa o indirecta como potables. Fuente: adaptado de WHO (2017).

Uno de los inconvenientes del uso de procesos de membrana es la gestión del concentrado resultante, que contiene todos los compuestos retenidos por las membranas. Si este concentrado no se puede reciclar al proceso de tratamiento o verter en condiciones ambientalmente seguras, se deberá proceder su tratamiento para eliminar los contaminantes retenidos. Para ello caben muchas posibilidades, como los que ya se han descrito de oxidación avanzada o adsorción con carbón activado.

## REFERENCIAS

- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S., & Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review. *Journal of hazardous materials*, 323, 274-298.
- Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A. S., Magnér, J., Dahlgren, L., ... & Karlsson, J. (2019). Sustainable treatment systems for removal of pharmaceutical residues and other priority persistent substances. *Water Science and Technology*, 79(3), 537-543.
- Bourgin, M., Beck, B., Boehler, M., Borowska, E., Fleiner, J., Salhi, E., ... & McArdell, C. S. (2018). Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. *Water research*, 129, 486-498.
- Lee, Y., & Von Gunten, U. (2012). Quantitative structure–activity relationships (QSARs) for the transformation of organic micropollutants during oxidative water treatment. *Water Research*, 46(19), 6177-6195.
- Leeuwen, K. V. (2003). *Technical Guidance Document on Risk Assessment. Part II Environmental Risk Assessment*.
- Mansouri, A., Cregut, M., Abbes, C., Durand, M. J., Landoulsi, A., & Thouand, G. (2017). The environmental issues of DDT pollution and bioremediation: a multidisciplinary review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181, 309-339. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2214-5>
- M'Arimi, M. M., Mecha, C. A., Kiprop, A. K., & Ramkat, R. (2020). Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109669
- McArdell, C. S., & Meier, A. (2019, November). The Swiss approach in reducing micropollutants in wastewater. In: *STOWA Workshop, Beating micropollutants in WWTPs* (Vol. 5).
- Miller, G. T., & Spoolman, S. E. (2010). *Environmental Science* (14 ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. 2012. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—a review. *Science of the Total Environment*, 429, 123-155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.028>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous materials*, 390, 122156.
- Wert, E. C., Rosario-Ortiz, F. L., & Snyder, S. A. (2009). Effect of ozone exposure on the oxidation of trace organic contaminants in wastewater. *Water research*, 43(4), 1005-1014.
- WHO, World Health Organization. (2017). *Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water*.
- Yangali-Quintanilla, V., Maeng, S. K., Fujioka, T., Kennedy, M., & Amy, G. (2010). Proposing nanofiltration as acceptable barrier for organic contaminants in water reuse. *Journal of Membrane Science*, 362(1-2), 334-345.