Ácido peracético como alternativa para una efectiva desinfección de aguas residuales en EDAR

Actualmente, existe la necesidad de garantizar la correcta desinfección de las aguas residuales con el fin de reducir los riesgos microbiológicos que pueden estar presentes, pero siempre buscando el equilibro de no generar riesgos químicos asociados a la presencia de subproductos de desinfección. En este estudio, se analiza la problemática que supone la reutilización de las aguas residuales, con el objetivo de encontrar agentes desinfectantes, que sean eficientes económicamente y que no supongan un problema para el medio ambiente ni para la salud humana. Los resultados obtenidos demuestran que el ácido peracético puede considerarse como una excelente alternativa, ya que permite cumplir los dos requisitos principales: una acción antimicrobiana adecuada y la ausencia de productos de desinfección potencialmente perjudiciales.

Palabras clave
EDAR, Murcia, desinfección, ácido peracético, eficacia, legislación, trihalometanos.

PERACETIC ACID AS AN ALTERNATIVE FOR EFFECTIVE WASTEWATER DISINFECTION IN A WWTP

Currently, there is a need to ensure a proper wastewater disinfection in order to reduce microbiological biohazard that might be present, but always searching a balance so no chemical risks are generated due to the presence of disinfection by-products. In this study, the issues of regenerated wastewater reuse are analyzed, with the aim of finding disinfectant agents that are economically efficient and do not pose a problem for the environment or human health. The results obtained show that peracetic acid can be considered an excellent alternative, since it allows fulfilling the main requirements: an adequate antimicrobial activity and the absence of potentially harmful disinfection by-products.

Keywords
WWTP, Murcia, treatment, peracetic acid, efficiency, legislation, trihalomethanes.

Daniel Sol Sánchez
investigador del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo

Adriana Laca Pérez
profesora titular del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo

Pedro Simón Andreu
director técnico de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (Esamur)

Manuel Abellán Soler
responsable de Explotación Zona 1 de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (Esamur)

María Isabel Gil Muñoz
profesora de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Francisca García Fernández
técnica de Explotaciones del Departamento de Depuración de Acciona

Yolanda Lucía Solano Martos
técnica de Explotaciones del Departamento de Depuración de Acciona

Amador Rancaño Pérez
technical leader del Departamento de O&M de Depuración y Potabilización de Acciona

1. INTRODUCCIÓN

Distintas actividades sociales, industriales o agrícolas requieren el uso de grandes cantidades de agua, lo que conlleva la generación de elevados volúmenes de aguas residuales que deben ser tratadas antes de ser devueltas al medio ambiente [1]. Con los tratamientos convencionales empleados en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), casi nunca es posible obtener un agua con un grado de calidad suficiente para poder ser reutilizada. En este contexto, las nuevas tecnologías avanzan hacia el desarrollo de sistemas de desinfección y tratamiento orientados a obtener un alto grado de calidad del agua mediante la eliminación de microorganismos y sustancias tóxicas [2].

Debe tenerse en cuenta que el sistema de tratamiento de las aguas residuales va a estar determinado por el origen, así como por el destino final del agua tratada. Por ejemplo, en las aguas residuales urbanas predominan los contaminantes orgánicos, incluyendo fármacos y sustancias biológicamente activas, lo que hace que la desinfección sea una fase fundamental en el proceso de tratamiento de estas aguas [3, 4]. En la actualidad, la radiación ultravioleta y el cloro y sus derivados son frecuentemente empleados en el tratamiento de las aguas residuales. En concreto, estos últimos son utilizados a nivel mundial en más de dos tercios de las plantas depuradoras. Los subproductos de desinfección que se generan a partir del empleo de cloro y sus derivados presentan diversos problemas en términos de salud pública y biota acuática. Las regulaciones cada vez son más estrictas y, por ello, se han realizado diversos estudios para buscar desinfectantes alternativos que sean más eficientes, económicos y ecológicos, siendo el ácido peracético (PAA) una solución viable, capaz de neutralizar eficazmente la contaminación microbiana [5], incluyendo el virus SARS-CoV-2, responsable de la enfermedad COVID-19 [6]. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha incluido al PAA dentro de los viricidas recomendados para evitar la propagación del virus a través de las aguas residuales [7].

» El ácido peracético se ha convertido en una alternativa fiable como agente desinfectante para la eliminación de un amplio rango de organismos patógenos. Por ello, y con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas superficiales de la Región de Murcia, se ha sustituido la cloración por el empleo de ácido peracético

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁCIDO PERACÉTICO

El ácido peracético o ácido peroxiacético (PAA) (CH_3CO_3H) fue sintetizado en el año 1902, aunque no fue considerado como agente bactericida hasta el año 1955 [8]. Es un fuerte oxidante con un elevado potencial estándar de oxidación (1,81 V) y un alto contenido de oxígeno reactivo (21,1%), lo que hace que este compuesto tenga especial importancia como desinfectante en diversos sectores (industria alimentaria, medicina, tratamiento de aguas residuales, etc.) [9].

Varios estudios indican que el PAA casi no produce subproductos tóxicos o mutagénicos derivados de la reacción con la materia orgánica presente en las aguas residuales [10]. La concentración de PAA en productos comerciales está comprendido entre el 5 y el 15%. Se trata de un líquido transparente, incoloro, corrosivo, con un olor acre fuerte y penetrante y sin capacidad de formación de espumas. Es inestable y su descomposición se acelera con el aumento de la temperatura y con valores de pH cercanos a 8,2 [9, 11].

3. NORMATIVA LEGAL

La transformación de los diferentes sectores hacia una economía circular se ha convertido en un tema de gran importancia en la gestión ambiental. Uno de los elementos fundamentales en dicha transformación es proporcionar prácticas más sostenibles en la gestión de recursos y residuos. Al ser el agua un recurso clave la normativa de la Unión Europea (UE) busca coordinar los esfuerzos de los Estados miembros para proteger las aguas europeas en términos de cantidad y calidad, a través de diversos marcos legislativos, como la Directiva Marco del Agua, la Directiva sobre tratamiento de aguas residuales urbanas y la Directiva sobre agua potable [12].

A fin de evitar el estrés hídrico que se está agravando en diversas regiones de Europa, la Comisión Europea pretende impulsar la reutilización del agua, siempre bajo unas condiciones seguras y rentables, con el claro objetivo de aliviar la presión sobre los recursos hídricos [13]. En este sentido, las aguas residuales tratadas podrían usarse en una amplia variedad de actividades, si bien el riego agrícola se ha considerado como la

principal fuente potencial de reutilización de agua tratada [14]. Recientemente, se ha publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea el Reglamento (UE) 2020/741 sobre los requisitos mínimos para la reutilización del agua [15]. En este texto se establecen los requisitos de calidad de las aguas residuales urbanas tratadas para el riego agrícola, en función de los siguientes parámetros: DBO_5, sólidos en suspensión, turbidez, *E. coli*, nematodos intestinales y *Legionella spp.* (**Tabla 1**).

En España, la calidad del agua depurada para su reutilización viene determinada por el Real Decreto 1620/2007, que establece los usos permitidos en cinco campos: agrario, ambiental, recreativo, industrial y urbano [16]. La ley contempla por norma general el cumplimiento de cuatro parámetros: nematodos intestinales, *E. coli*, sólidos en suspensión y turbidez. En aquellos casos donde haya riesgo de aerosoles, también se contempla la regulación de la *Legionella spp.* (**Tabla 1**). Teniendo en cuenta la desactualización existente en dicha normativa, en octubre de 2020 se propusieron una serie de directrices incluidas dentro del Plan DSEAR para adoptar dicha normativa a los nuevos parámetros presentados en la UE [17]. En Portugal, la normativa que establece el régimen legal de reutilización de agua obtenida del tratamiento de aguas residuales aparece recogida en el Decreto Ley 119/2019 [18].

4. EL ÁCIDO PERACÉTICO EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Distintos trabajos han analizado el empleo del PAA como agente desinfectante en aguas residuales de EDAR. Ao y col. [9] resumen varios estudios que utilizan el PAA para la eliminación de distintos contaminantes orgánicos como disruptores endocrinos y compuestos farmacéuticos, con unas eficacias de eliminación iguales o superiores a las obtenidas utilizando cloro u ozono. La inactivación de patógenos presentes en aguas residuales se ha estudiado en menor profundidad, aunque se encuentran diversos trabajos que analizan el efecto de PAA sobre *E. coli*, *Enterococcus spp.*, coliformes fecales, norovirus murino y *Salmonella spp.*, lográndose en algunos casos la inactivación total de los mismos [19]. Los mejores resultados se han obtenido con PAA en combinación con la radiación UV, favoreciendo la formación de radicales hidroxilos y la posterior mayor capacidad de eliminación de los agentes patógenos [20].

También se ha analizado el uso de PAA en lodos provenientes de una EDAR urbana de Finlandia [21]. El tratamiento antes de la digestión anaeróbica ayuda a mejorar la solubilización de la materia orgánica y la degradación de los lodos. El peróxido de hidrógeno presente no solo es capaz de actuar como desinfectante e higienizante evitando la formación de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoniaco (NH_3) que contribuyen al mal olor, sino que es capaz de reducir el volumen de lodos y mejorar la deshidratación de los mismos debido a la oxidación de las sustancias

TABLA 1

REQUISITOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS TRATADAS PARA LOS PRINCIPALES PARÁMETROS A ANALIZAR EN FUNCIÓN DEL POSTERIOR USO EN UE, ESPAÑA Y PORTUGAL. Nota: (*) La regulación en España para nematodos viene dada por huevo/10 L. Dentro de cada uso regulado existen distintos tipos de calidad de agua en función de su destino, de ahí que los intervalos sean variables. En algunos casos, no se exige un mínimo de calidad.

Usos		DBO_5 (mg/L O_2)	Sólidos en suspensión (mg/L)	Turbidez (UNT)	*E. coli* (UFC/100 mL)	Nematodos (huevo/L)	*Legionella spp.* (UFC/L)
Usos regulados UE	Agrícola	10 – Sin límite	10 – Sin límite	5 – Sin límite	10 – 10.000	1	1.000
Usos regulados España	Urbano	–	10 – 20	2 – 10	0 – 200	1*	100
	Agrícola	–	20 – 35	10 – Sin límite	100 – 10.000	1*	1.000
	Industrial	–	5 – 35	1 – 15	Ausencia – 10.000	1 – Sin límite*	100
	Recreativo	–	20 - 35	10 – Sin límite	200 – 10.000	1 – Sin límite*	100
	Ambiental	–	10 – 35	2 – Sin límite	0 – Sin límite	1 – Sin límite*	–
Usos regulados Portugal	Agrícola	10 – 40	10 – 60	5 – Sin límite	10 – 10.000	1 – Sin límite	–
	Urbano	0 – 25	–	5 – Sin límite	10 – 200	–	–
	Industrial	–	–	5	10 – 1000	–	–

TABLA 2

COMPARACIÓN ENTRE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Tipo de desinfección	Mecanismo	Contaminantes diana	Ventajas	Desventajas
Cloración	$HClO/ClO^-$	Bacterias, biofilms bacterianos, hongos, algas y virus	✓ Fácil de implementar ✓ No requiere el uso de un sistema complejo y es el menos costoso ✓ Menos peligroso que el cloro gas (Cl_2) ✓ Se puede generar *in situ*, reduciendo la peligrosidad de transporte y manipulación	X Alta formación de subproductos (trihalometanos y ácidos haloacéticos) X Concentración de la disolución (12-15%), peligroso para los trabajadores (pH alto, corrosivo, quemaduras) X Inestable X Su generación *in situ* puede generar hidrógeno gas X Podría desarrollar resistencia microbiana X Alta fitotoxicidad X Inactivación en presencia de grandes cantidades de materia orgánica
Ozonización	Ozono (O_3) Radicales libres	Bacterias, virus y protozoos	✓ Considerado seguro para su uso en la industria alimentaria ✓ Se puede generar a través del oxígeno del aire ✓ Alto potencial de oxidación ✓ No resistencia microbiana	X Puede generar subproductos en reacción con materia orgánica X Alto coste de instalación y mantenimiento X El ozono residual debe ser eliminado X Es muy reactivo, corrosivo en la naturaleza y extremadamente irritante y tóxico si se inhala X Alta fitotoxicidad
Radiación ultravioleta	Amplio espectro (200-280 nm) y longitud de onda específica, 254 nm	Bacterias, virus, protozoos y hongos	✓ Fácil de instalar y de mantener ✓ Baja y/o nula generación de subproductos ✓ Se puede combinar con procesos de oxidación avanzados ✓ Desarrollo de tratamientos innovadores (UV-led)	X Posible crecimiento rebrote microbiano X Efectividad reducida en agua turbias
Peróxido de hidrógeno	H_2O_2	Bacterias y virus	✓ Fácil de usar ✓ Estable a amplios rangos de pH ✓ Con estabilizantes aumenta su eficacia de desinfección ✓ Buen oxidante ✓ No genera subproductos tóxicos ✓ Reduce DBO, DQO, mal olor y espumas en aguas	X Bactericida no específico, actúa mejor sobre bacterias gram-positivo X A pH muy alcalinos se descompone X Se descompone al entrar en contacto con ciertos metales X Necesidad de dosis altas para ser efectivo
Ácido peracético	PAA, peróxido de hidrógeno y ácido acético	Bacterias, biofilms bacterianos, hongos, esporas, virus y quistes de protozoos	✓ Fácil de usar ✓ Amplio espectro de actividad y eficaz a bajas concentraciones ✓ No depende de la carga de materia orgánica, sólidos totales en suspensión, amoniaco, nitritos y fosfatos ✓ Pequeña dependencia del pH ✓ Eficaz bajo un amplio rango de temperaturas ✓ Fuerte oxidante ✓ Alta capacidad de esterilización ✓ Requiere de cortos periodos de contacto ✓ Baja formación de subproductos peligrosos	X Posible crecimiento microbiano tras el tratamiento por la generación de ácido acético X Necesidad de altas dosis para inactivar esporas bacterianas y quistes de protozoos X Posible formación de subproductos de yodo y bromo X Incremento de la DQO

poliméricas extracelulares (EPS). Los EPS son causantes de la formación de espumas. Por lo tanto, el uso de PAA evita su aparición. Además, los macronutrientes, como nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, magnesio o azufre, no se ven afectados por el empleo de PAA, lo que hace que los lodos tratados puedan seguir siendo empleados como fertilizantes.

TABLA 3

CONCENTRACIONES DE SALIDA DE TRIHALOMETANOS EN 15 EDAR DE LA REGIÓN DE MURCIA (VALORES MEDIOS DURANTE EL PERIODO MARZO-SEPTIEMBRE DE 2020).

Concentración	THM totales ($\mu g \cdot L^{-1}$)	CFM ($\mu g \cdot L^{-1}$)	DCBM ($\mu g \cdot L^{-1}$)	DBCM ($\mu g \cdot L^{-1}$)	TBM ($\mu g\ L^{-1}$)
Media	326,8	223,1	27,0	6,8	1,8
Máximo	1.280,0	1.149,4	117,0	28,5	6,2
Mínimo	12,0	3,6	0,8	0,4	0,0

5. COMPARACIÓN GENERAL DEL ÁCIDO PERACÉTICO CON OTROS AGENTES DE DESINFECCIÓN

Considerando la futura reutilización del agua tratada, la elección de un método de desinfección adecuado resulta fundamental a la hora de conseguir una correcta eliminación de los agentes potencialmente patógenos. Otro importante aspecto a considerar es la formación de subproductos peligrosos que se puedan generar durante el tratamiento de desinfección [22, 23]. Los principales procesos de desinfección empleados en aguas residuales, así como sus ventajas e inconvenientes, aparecen resumidos en la **Tabla 2**.

La cloración es el tratamiento convencional empleado con mayor frecuencia a nivel mundial, siendo el hipoclorito el agente desinfectante más ampliamente utilizado. Se trata del producto comercial menos costoso y presenta, además, un amplio rango de inactivación de agentes patógenos, si bien cuenta con grandes desventajas como la generación de subproductos potencialmente peligrosos como los trihalometanos, los ácidos haloacéticos y los cloratos, siendo los primeros altamente cancerígenos. Su efectividad depende de la dosis usada, características del agua, condiciones de operación y tiempo de contacto [22].

La radiación ultravioleta (UV) es otro agente muy utilizado en tratamientos de desinfección por su relativo bajo costo. Su mayor inconveniente es que su eficacia depende de distintos factores como la calidad del agua, la turbidez y la velocidad del flujo y, además, puede favorecer un crecimiento microbiano después del tratamiento, mediante mecanismos de fotoreactivación [22, 23].

La ozonización es una tecnología capaz de inactivar una amplia gama de agentes patógenos. Sus principales inconvenientes residen en un alto coste de instalación y de mantenimiento, la facilidad de formación de subproductos tóxicos y peligrosos, así como la posibilidad de que exista ozono residual tras el tratamiento [22, 23].

El peróxido de hidrógeno no es muy utilizado para la desinfección de aguas residuales debido a su baja acción y eficiencia. Se trata de un bactericida que actúa de forma más eficaz sobre bacterias gram-positivas, como los *Enterococcus*, que sobre las gram-negativas, como *E. coli* y *Salmonella spp*. Y se descompone fácilmente en presencia de ciertos metales, como el hierro, cobre, manganeso, níquel y cromo [24, 25].

El ácido peracético se ha convertido en una alternativa fiable como agente desinfectante para la eliminación de un amplio rango de organismos patógenos. Varios estudios han demostrado que el PAA produce muy pocos subproductos mutagénicos, ya que principalmente genera ácidos carboxílicos. Además, sus productos de descomposición son ácido acético, peróxido de hidrógeno, oxígeno y agua, moléculas simples y seguras [5]. Las principales desventajas son el incremento de la concentración de la materia orgánica en el agua tratada debido al aumento en el contenido de ácido acético (presente en el producto comercial y generado como subproducto de descomposición del PAA). Por ejemplo, para una dosis de 2,5 ppm de PAA, podrían formarse 6,5 ppm de ácido acético, lo que implica que la DQO se incrementaría en 7 ppm.

6. CONTRASTE DE RESULTADOS DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La Región de Murcia mantiene una elevada preocupación por el mantenimiento de su sistema de tratamiento de aguas, con el 100% de sus aguas residuales tratadas, y reutilizadas principalmente para riego agrícola. Los sistemas de desinfección más utilizados hasta la fecha en esta región son la radiación ultravioleta y la cloración mediante el empleo de hipoclorito sódico.

Acciona y Esamur han analizado las concentraciones de cloroformo (CFM), diclorobromometano (DCBM), dibromoclorometano (DBCM), tribromometano (TBM) y tri-

halometanos totales (THM), en la salida de 15 de sus instalaciones. En la **Tabla 3** se muestran resultados promedio de los valores de vertido de las instalaciones analizadas, donde las concentraciones de THM son superiores a lo recomendado, para no afectar negativamente a la calidad de las aguas superficiales, y superiores también a la limitación, impuesta por Esamur, de concentraciones máximas de 100 $\mu g \cdot L^{-1}$ de THM en el efluente tratado para ser reutilizado.

7. LAS CARACTERÍSTICAS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR ÁCIDO PERACÉTICO

Se han realizado experimentos de desinfección a nivel de laboratorio con hipoclorito sódico (15%) y peróxido de hidrógeno (50%) y se han comparado con el tratamiento con PAA (15%). En la **Figura 1** se muestra uno de los ensayos de laboratorio llevado a cabo para determinar las dosis óptimas de desinfectante. Se muestra que la dosis óptima para neutralizar una concentración de $5{,}88 \cdot 10^4$ UFC/100 mL de *E. coli* con PAA (15%) es de 3 ppm, un valor muy inferior al que se requiere para el caso de hipoclorito 15% (6 ppm) o peróxido de hidrógeno 50% (24 ppm).

Los resultados obtenidos son convincentes, y con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas superficiales de la Región de Murcia, se ha sustituido la cloración por el empleo de ácido peracético desde octubre de 2020 en las instalaciones operadas por Acciona.

8. ALGUNOS DATOS ECONÓMICOS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

El análisis de costes presenta siempre algunos componentes muy específicos, pero resultan adecuados para señalar tendencias u oportunidades en condiciones análogas. Se han evaluado los costes de inversión y los costes de operación y mantenimiento de diferentes sistemas de desinfección. Los datos se muestran en la **Tabla 4**. Se ha tomado como referencia para la comparación una planta de 160 m^3/h y una salida requerida de 100 UFC/100 mL. Puede observarse que, aunque la cloración es el sistema de desinfección más convencional y menos costoso, el

FIGURA 1. Ensayos de laboratorio, efecto de las dosis de diferentes agentes químicos sobre la eficiencia de desinfección para una concentración inicial de $5{,}88 \cdot 10^4$ UFC/100 mL de *E. coli*.

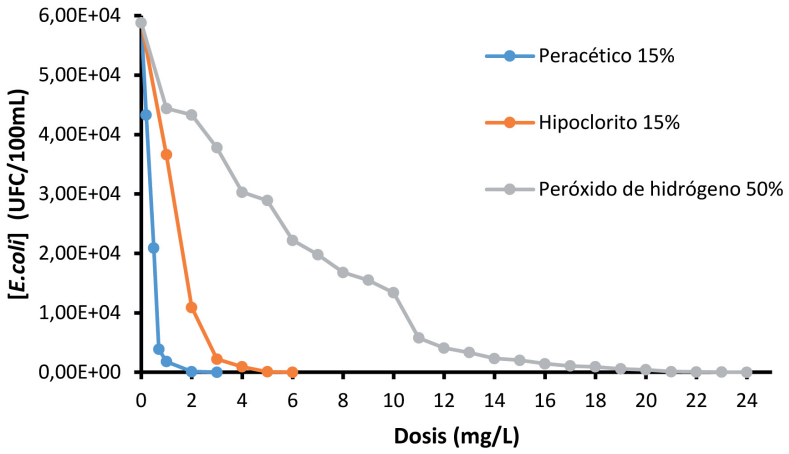

TABLA 4

COSTES DE EXPLOTACIÓN E INVERSIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS DE DESINFECCIÓN (FUENTES: ESAMUR Y ACCIONA AGUA).

Costes de explotación (euros/m^3)				
Partida	**UV**	**Cloración**	**Ácido peracético**	**Ozono**
Personal	0,0035	0,0006	0,0006	0,0086
Mantenimiento	0,0020	0,0002	0,0002	0,0071
Reposición lámparas	0,0072	0	0	0
Reactivos	0	0,0130	0,0190	0,0135
Consumo de energía	0,0081	0,0003	0,0003	0,0138
TOTAL	**0,0208**	**0,0141**	**0,0201**	**0,0429**
Costes de inversión (euros)				
Partida	**UV**	**Cloración**	**Ácido peracético**	**Ozono**
Equipos	89.000	7.500	10.000	175.000
Obra civil	15.000	20.000	20.000	20.000
TOTAL	**104.000**	**27.500**	**30.000**	**195.000**
Coste de inversión en euros/m^3/h	**650**	**172**	**188**	**1.219**

» Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo, el PAA se ha convertido en una alternativa muy eficaz en los procesos de desinfección de aguas residuales. Sus costes de explotación e inversión están muy próximos a los obtenidos para la cloración, siendo sus principales ventajas la no generación de trihalometanos (altamente tóxicos y cancerígenos) como subproductos y que, además, se necesita menor concentración en comparación con el uso de hipoclorito

PAA se muestra como una alternativa fiable para una desinfección igual de eficaz a un coste en el mismo orden de magnitud.

9. CONCLUSIONES

Debido a la creciente necesidad de incrementar la disponibilidad de agua, la desinfección de las aguas residuales para su posterior uso en diferentes aplicaciones se ha convertido en uno de los principales temas de actualidad. El tratamiento para la obtención de aguas de alta calidad a bajo coste y que, además, no resulte nocivo para el medio ambiente y los seres humanos, implica la búsqueda de agentes desinfectantes que reúnan esos requisitos.

En este sentido, teniendo en cuenta los resultados descritos en este trabajo, el PAA se ha convertido en una alternativa muy eficaz en los procesos de desinfección de aguas residuales. Sus costes de explotación e inversión están muy próximos a los obtenidos para la cloración, siendo sus principales ventajas la no generación de THM (altamente tóxicos y cancerígenos) como subproductos de desinfección, y que, además, se necesita menor concentración en comparación con el uso de hipoclorito.

Bibliografía

[1] Shah, E.; Liebrand, J.; Vos, J.; Veldwisch, G.J.; Boelens, R. (2018). The UN World Water Development Report 2016. Water and jobs: A critical review". Dev. Chang., núm. 49, págs. 678-691.

[2] Rajasulochana, P.; Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water - A comprehensive review. Resour. Technol., núm. 2, págs. 175-184.

[3] Thiebault, T.; Boussafir, M.; Le Milbeau, C. (2017). Occurrence and removal efficiency of pharmaceuticals in an urban wastewater treatment plant: ass balance, fate and consumption assessment. J. Environ. Chem. Eng., núm. 5, págs. 2.894-2.902.

[4] Romanucci, V.; Siciliano, A.; Guida, M.; Libralato, G.; Saviano, L.; Luongo, G.; Previtera, L.; Di Fabio, G.; Zarrelli, A. (2020). Disinfection by-products and ecotoxic risk associated with hypochlorite treatment of irbesartan. Sci. Total. Environ., núm. 712, pág. 135.625.

[5] Luongo, G.; Previtera, L.; Ladhari, A.; Di Fabio, G.; Zarrelli, A. (2020). Peracetic acid vs. sodium hypochlorite: degradation and transformation of drugs in wastewater. Molecules, núm. 25, pág. 2.294.

[6] OMS (2020). Agua, saneamiento, higiene y gestión de desechos en relación con el SARS-CoV-2, el virus causante de la COVID-19.

[7] Kataki, S.; Chatterjee, S.; Vairale, M.G.; Sharma, S.; Dwivedi, S.K. (2020). Concerns and strategies for wastewater treatment during COVID-19 pandemic to stop plausible transmission. Resour. Conserv. Recycl., núm.164, pág. 105.156.

[8] Fraise, A.P.; Maillard, J.Y.; Sattar, S.A. (2013). Russell, Hugo & Ayliffe's: principles and practice of disinfection, preservation and sterilization. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.

[9] Ao, X.W.; Eloranta, J.; Huang, C.H.; Santoro, D.; Sun, W.J.; Lu, Z.D.; Li, C. (2020). Peracetic acid-based advanced oxidation processes for decontamination and disinfection of water: A review. Water Res., núm. 188, pág. 116.479.

[10] Monarca, S.; Richardson, S.D.; Feretti, D.; Grottolo, M.; Thruston, A.D.; Zani, C.; Navazio, G.; Ragazzo, P.; Zerbini, I.; Alberti, A. (2002). Mutagenicity and disinfection by-products in surface drinking water disinfected with peracetic acid. Environ. Toxicol. Chem., núm. 21, págs. 309-318.

[11] Kim, J.; Huang, C.H. (2020). Reactivity of peracetic acid with organic compounds: A critical review". ACS EST Water, https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00029.

[12] Smol, M.; Adam, C.; Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. J. Mater Cycles Waste Manag., núm. 22, págs. 682-697.

[13] Comisión Europea (2015). Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. Comunicación nº 614.

[14] Parlamento Europeo (2018). Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. COM/2018/337 final.

[15] Parlamento Europeo (2020). 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. L 177/32.

[16] Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE-A-2007-21092.

[17] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Secretaría de Estado de Medio Ambiente (2020). Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR).

[18] Diário da República n.º 179/2019, Série I de 2019-09-18, que estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização. Lei nº 119/2019, págs. 3-27.

[19] Kitis, M (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review. Environ. Int., núm. 30(1), págs. 47-55.

[20] Da Silva, W.P.; Carlos, T.D.; Cavallini, G.S.; Pereira, D.H. (2020). Peracetic acid: structural elucidation for applications in wastewater treatment. Water Res., núm. 168, pág. 115.143.

[21] Luukkonen, T.; Prokkola, H.; Pehkonen, S.O. (2020). Peracetic acid for conditioning of municipal wastewater sludge: Hygienization, odor control, and fertilizing properties. Waste Manage., núm. 102, págs. 371-379.

[22] Tak, S.; Vellanki, B.P.; Ahuja, S. (2020). Chapter 6: A review on disinfection and disinfection byproducts. Contaminants in our water: identification and remediation methods. ACS Symposium Series, American Chemical Society, vol. 1.352, págs. 105-117.

[23] Dandie, C.E.; Ogunniyi, A.D.; Ferro, S.; Hall, B.; Drigo, B.; Chow, C.W.K.; Venter, H.; Myers, B.; Deo, P.; Donner, E.; Lombi, E. (2019). Disinfection options for irrigation water: reducing the risk of fresh produce contamination with human pathogens. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., núm. 50(20), págs. 2.144-2.174.

[24] Ksibi, M. (2006). Chemical oxidation with hydrogen peroxide for domestic wastewater treatment. Chem. Eng. J., núm. 119(2-3), págs. 161-165.

[25] Collivignarelli, M.C.; Abbà, A.; Benigna, I.; Sorlini, S.; Torretta, V. (2018). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. Sustainability, núm. 10, pág. 86.