

Aplicación de la oxidación avanzada en la desinfección de aguas residuales

Dr. Ángel Guillemes Peira, Profesor – Investigador,
Universidad del Pacífico, Guayaquil, Ecuador.
angel.guillemes@upacifico.edu.ec, angel_guillemes@hotmail.com

RESUMEN

Dada la importancia de la desinfección en la regeneración del agua, el objetivo fue investigar y evaluar la eficacia desinfectante de la tecnología electroquímica frente a bacterias tipo Escherichiacoli, en el efluente de una estación depuradora de aguas residuales. El tratamiento se planteó como alternativa al tratamiento terciario existente, llevándose a cabo sin ningún tipo de aditivación ni pretratamiento, pero basándose, en parte, en la acción biocida de diferentes sustancias químicas que fueron producidas electroquímicamente y, en parte, en la oxidación directa de determinados grupos químicos de las proteínas de membrana por aplicación de campos eléctricos. Los resultados confirman que la eficacia desinfectante de la tecnología electroquímica se basa en la suma de múltiples acciones biocidas, lo que le confiere la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones del agua.

Palabras clave: agua residual, desinfección, electroquímica, Escherichiacoli, oxidación avanzada.

Applying advanced oxidation in wastewater disinfection

ABSTRACT

Due to the importance of disinfection on water regeneration, the main objective of this study was to investigate and evaluate the effectiveness of electrochemical disinfection technology to remove Escherichia coli type bacteria in a wastewater treatment plant effluent. This treatment was proposed as an alternative to existing tertiary treatment being conducted without any additives or pretreatment, but based in part on the biocidal action of different chemicals that were produced electrochemically and, in part, on the direct oxidation of certain chemical groups of membrane proteins by the application of electric fields. The results confirm that the disinfectant efficacy of electrochemical technology is based on the sum of multiple biocidal actions, giving it the ability to adapt to different water conditions.

Keywords: wastewater, disinfection, electrochemistry, Escherichiacoli, advanced oxidation.

INTRODUCCIÓN

Frente al actual problema de escasez de agua, se origina la necesidad de encontrar otras alternativas de suministro. La reutilización de las aguas depuradas se muestra como una opción con una gran potencial e interés para muchos sectores. Los tratamientos tradicionales que son realizados en una estación depuradora de agua residual (EDAR) no son suficientes para poder obtener un agua regenerada de calidad, lo que implica la necesidad de investigar y desarrollar procesos innovadores que permitan mejorar el resultado del agua de los efluentes de las EDARs, cumpliendo con los requerimientos establecidos a nivel normativo o legislativo relativo a la reutilización de las aguas regeneradas.

Los procesos de oxidación avanzada (POAs) surgen como una opción de tratamiento que permite mejorar significativamente la calidad de los efluentes. Existen diversos POAs, encontrándose entre los más habituales los que emplean combinaciones de O₃, H₂O₂, radiación UV y fotocátalisis (Arihara et al. 2007). Los POAs presentan hoy en día un nivel de desarrollo y comercialización diverso, en constante evolución a medida que se avanza científica y tecnológicamente en el tema. Entre los diversos POAs que son aplicables para la obtención de un agua regenerada, se ha seleccionado el tratamiento electroquímico.

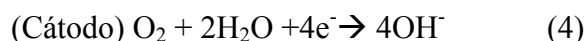
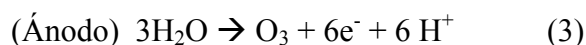
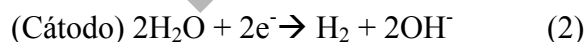
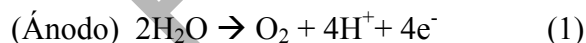
Los tratamientos electroquímicos han alcanzado un estado en el que no son solamente comparables, desde el punto de vista económico con otros procesos, sino que también son más eficientes, compactos y automatizados. Se trata de procesos utilizados en el tratamiento de aguas residuales, que utilizan electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación de contaminantes presentes en las aguas. Un sistema electroquímico está formado básicamente por un ánodo donde tiene lugar la oxidación, un cátodo donde tiene lugar la reducción, y una fuente de potencia encargada de suministrar la electricidad.

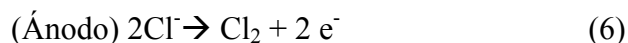
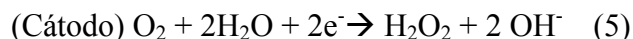
METODOLOGÍA

La desinfección electroquímica aplicada por el sistema empleado trabajó sin adición de compuestos químicos en el agua a tratar, pero basándose en parte en la acción biocida de diferentes sustancias químicas, que en este caso fueron producidas electroquímicamente y en parte en la oxidación directa de determinados grupos químicos de las proteínas de membrana, por aplicación de campos eléctricos. De esta manera la desinfección electroquímica de agua, puede definirse como la eliminación de microorganismos por aplicación de una corriente eléctrica en el agua, mediante el empleo de los electrodos adecuados.

Generación de especies químicas de acción biocida

En el límite de fase entre los electrodos y el agua, la corriente eléctrica conduce a la producción electroquímica de diferentes especies desinfectantes a partir del agua (O₂, O₃, OH⁻) ecuaciones (1, 2, 3) (Arihara et al. 2007), o de algunas especies disueltas en el agua (Cl₂, HClO, ClO⁻) ecuaciones (4, 5, 6, 7) (Bergmann and Koparal 2005). Para todo esto se aplica corriente continua entre los electrodos, provocando las reacciones químicas deseadas (Kraft 2008):





El pH alcalino en la región catódica ecuaciones (2, 4, 5) conduce a la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) e hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) en aguas incrustantes con alto contenido de iones de calcio y magnesio como era el caso del agua residual de la EDAR (Alcalinidad=322 mg/l; Dureza=968 mg/l; ISL=0,55).

Electroporación y oxidación directa de proteínas de membrana por campos eléctricos

La exposición de una célula a un campo eléctrico tiene como consecuencia una amplia variedad de respuestas bioquímicas y fisiológicas, la mayoría de las cuales se basa en la alteración del potencial transmembrana. Cuando el potencial sobrepasa un valor umbral (0,2-1 v) puede producirse un poro en la membrana, fenómeno conocido como electroporación o electropermeabilización (Wouters et al. 2001). Los valores más bajos de potencial transmembrana se dan en los polos de las células y son proporcionales al diámetro celular. Según esto, las células más grandes y de morfología alargada son más susceptibles a los campos eléctricos que las más pequeñas y ovaladas. Asimismo, el potencial crítico depende entre otras cosas de la temperatura (un aumento de temperatura aumenta la tensión de la membrana y disminuye el potencial crítico). El problema a estas intensidades de campo eléctrico ($< 1 \text{ v}$) es que la electroporación puede ser reversible (Simpson et al. 1999), pero si se aplican potenciales incluso menores al umbral de electroporación, en pulsos de larga duración con intervalos de larga duración, se presenta un efecto acumulativo en el potencial de membrana llegando a provocar la electroporación irreversible y la muerte celular (Machado et al. 2010), (Matsuki et al. 2008).

El sistema empleado no solo busca alterar el potencial transmembrana para producir la electroporación, sino que ataca directamente los grupos aminos expuestos en las porinas de la membrana, produciendo su desnaturalización y como consecuencia la electroporación y la muerte celular.

pH, temperatura y conductividad

En este tipo de tratamiento, las medidas fisicoquímicas (pH, temperatura y conductividad), son importantes por suponer una lectura indirecta de lo que sucede en el agua. Hay que destacar que en el límite de fase entre los electrodos y el agua se producen radicales OH^\cdot . Normalmente, en este tipo de reacciones parte de los protones H^+ se pierden en forma de H_2 , por lo que el agua tiende a aumentar su pH. Pero cuando los grupos hidroxilos generados se consumen como desinfectante el agua tratada disminuye su pH (Min et al. 2004).

Una vez desinfectada el agua, los iones hidroxilo dejan de reaccionar y quedan en el agua como desinfectante residual. Se hace necesario modular las citadas reacciones para que finalmente y tras haber desinfectado el agua, esta quede equilibrada (si no se detuvieran las reacciones una vez desinfectada, el agua tendería a ir subiendo su pH). Esta cualidad tiene como consecuencia un relativo efecto tampón en el tratamiento.

La medición de la temperatura tiene como principal objetivo, el de comprobar que el tratamiento electroquímico no produce un aumento significativo de la misma que pudiera condicionar o afectar al proceso de desinfección. Si la diferencia de la temperatura entre el valor

de entrada al tratamiento y el de salida no sufre un aumento significativo, se puede decir que no desempeña ningún efecto en la desinfección (Machado et al. 2010).

La conductividad es evaluada para reflejar que no hay adición de sales durante el tratamiento y que este no produce modificaciones sustanciales sobre la misma.

Potencial óxido reducción, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno

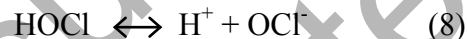
El potencial de oxidación-reducción (ORP), oxígeno disuelto (OD), demanda biológica (DBO5) y demanda química de oxígeno (DQO), al igual que la propia desinfección, da una idea de la producción de agentes oxidantes durante el tratamiento.

El potencial de oxidación reducción o potencial redox, indica la actividad o la fuerza de los oxidantes o reductores en el agua y será en función de su concentración en la misma. Un agua oxidante donde la concentración de oxidantes es mayor que la de reductores tendrá tendencia a captar electrones y mostrará un potencial redox positivo. Por el contrario un agua reductora donde la concentración de reductores es mayor que la de oxidantes, tendrá tendencia a ceder electrones y por tanto mostrará un potencial redox negativo. En una perspectiva microbiológica, un oxidante arranca electrones de la membrana celular causando su desestabilización y ruptura, lo que causa la muerte celular. En un agua residual con cargas altas de materia orgánica, el medio será claramente reductor y mostrará potenciales redox muy negativos.

Se puede observar en numerosas referencias que la supervivencia de una bacteria *Escherichiacoli* a un potencial redox de 485 mv es de más de 5 minutos, mientras que a potenciales mayores de 665 mv la supervivencia es menor de 10 segundos (Suslow 2004).

Cloro libre

El cloro libre es una forma genérica de hablar de las formas reactivas del cloro, sin embargo es importante distinguir entre ellas ya que su capacidad biocida es muy diferente. Mientras que HOCl es una molécula muy reactiva, el OCl⁻ lo es mucho menos y la forma en que se presente en el agua va a depender fundamentalmente del pH (ecuación 8).



De esta manera, en un pH neutro el cloro libre se repartirá en un equilibrio del 50% en cada una de sus formas, mientras que a un pH más ácido el equilibrio se desplazará hacia HOCl y a un pH más básico el equilibrio tenderá hacia la forma de OCl⁻ (Kelley 2004).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se llevó a cabo un estudio longitudinal de las mediciones diarias de las medidas indirectas (pH, ORP y OD) y de los datos microbiológicos registrados en el agua de entrada y salida de la EDAR. Para ello se calculó el valor medio diario de las mediciones de entrada y salida de cada una de las variables y se realizó un análisis descriptivo estándar, estimando el valor mínimo, máximo, media y desviación típica de cada variable a la entrada y a la salida a sabiendas de que las mediciones diarias fueron independientes entre sí y que las características del agua de entrada al tratamiento fueron similares durante los días de recogida de muestras. Posteriormente se realizó una comparación de la distribución de las mediciones de cada variable a la entrada y la salida comprobando la existencia de diferencias significativas

entre ambas mediante el test de *Wilcoxon* para muestras apareadas y tomando un nivel de significación $\alpha=0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

pH, temperatura y conductividad

En la tabla 1 se presentan los valores medios de la temperatura, pH y conductividad que se registraron.

Tabla 1. Valores medios de temperatura, pH y alcalinidad

Parámetros	Entrada	Salida
pH	6,93	6,85
T ^a (°C)	16,38	16,99
Conductividad (µs/cm)	4716	4733

En el caso del pH, el valor registrado siempre fue inferior tras el tratamiento como se puede apreciar en la figura 1. Concretamente, el pH de la salida siempre fue de media 0,07 unidades menor que en la entrada con una significancia de $p= 0,006$.

Durante el ensayo se observó que el intervalo entre máximos y mínimos fue de 1,02 unidades en el influente mientras que tras el tratamiento el intervalo fue de 0,48 unidades.

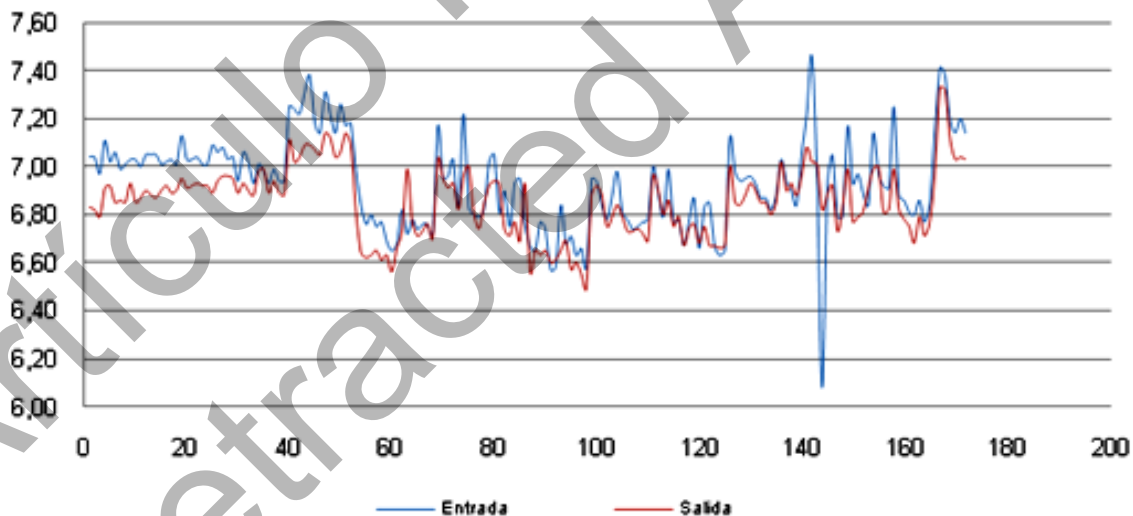


Figura 1. Mediciones de pH en influente y efluente

Se pudo observar un paralelismo entre la temperatura de la corriente de entrada y la de salida, representado en la figura 2. El valor de la temperatura de salida siempre estuvo por encima de la de entrada al tratamiento, en un rango siempre inferior a 1°C, por lo que se puede concluir que no fue un aumento significativo y que no desempeñó ningún efecto en la desinfección registrada.

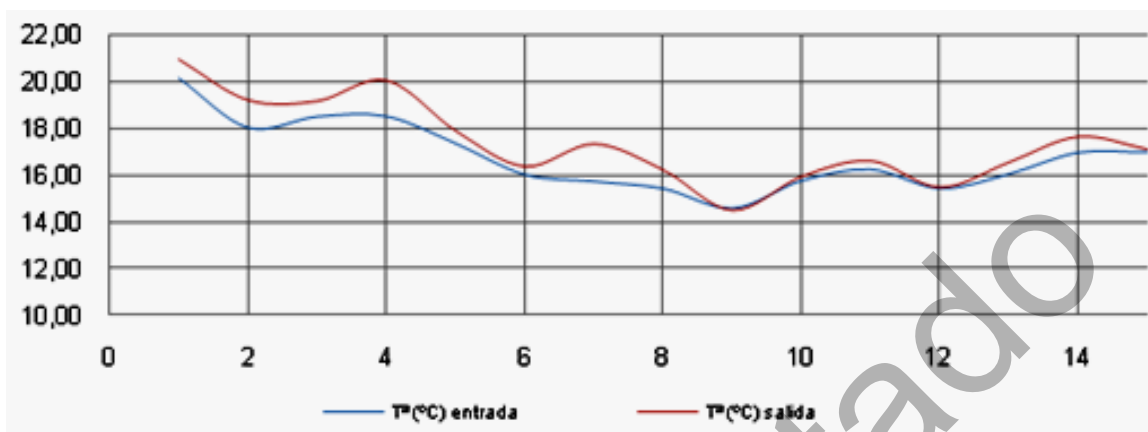


Figura 2. Representación de temperatura en influente y efluente

La media de los valores registrados para la conductividad, figura 3, fue ligeramente más elevada en las muestras tratadas que en las de agua bruta, sin embargo, la diferencia no fue significativa (17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de media).

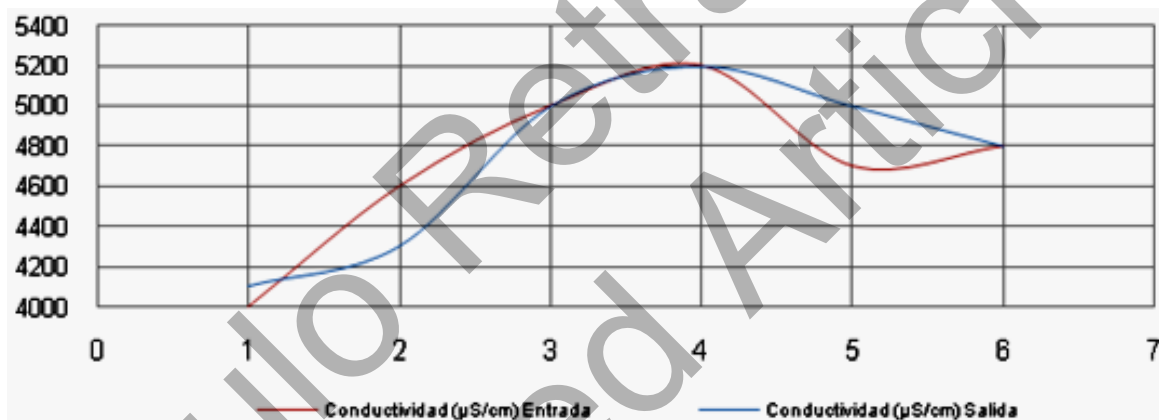


Figura 3. Conductividad en influente y efluente

Potencial óxido reducción, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno.

Los valores medios para el potencial de oxidación-reducción, oxígeno disuelto, demanda biológica y demanda química de oxígeno del influente se representan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores medios de ORP, OD, DBO5 y DQO

Parámetros	Entrada	Salida
ORP (mv)	2,26	10,85
OD (%)	51,21	68,12
DBO5 (mg/l)	34,8	14,6
DQO (mg/l)	119,5	67,8

Como se puede observar en la tabla 2 el agua bruta de entrada al tratamiento reflejó un potencial ligeramente positivo (2,26 mv), lo que resulta concordante con un agua residual ya tratada en un proceso secundario. El aumento de potencial redox que se reflejó en el agua de salida siempre fue mayor que en la entrada (media de 10,85 mv), lo que indica que se generaron

oxidantes durante el tratamiento y no de manera proporcional o en una relación lineal con la entrada, ya que el rango de mínimos a máximos para la entrada fue de 17,13 mv mientras que para el agua de salida fue de 39,23 mv. Los valores de potencial redox a la entrada y a la salida se representan en la figura 4.

Estos valores de redox a la salida del tratamiento son sin embargo la consecuencia del tratamiento, pero no del tratamiento en sí mismo lo que no es compatible, dada la retención en el depósito, con los datos de desinfección obtenidos. Sin embargo, sí explica estos resultados, en coalición con todos los oxidantes generados, el hecho de que el potencial redox entre ánodo y cátodo en el interior de los reactores se alcance valores superiores a los 1000 mv.

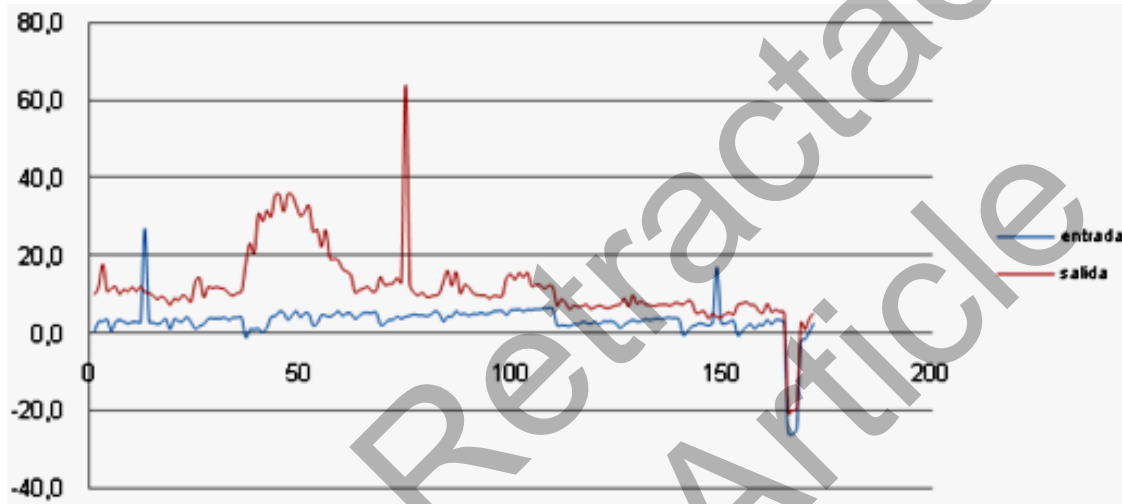


Figura 4. Valores de potencial redox a la entrada y a la salida del tratamiento

Como se ha visto anteriormente uno de los productos generados electroquímicamente a partir del agua es el oxígeno. Como se puede apreciar en la figura 5, el oxígeno disuelto fue una media de 16,91 unidades porcentuales mayor en el agua tratada que en el agua bruta.

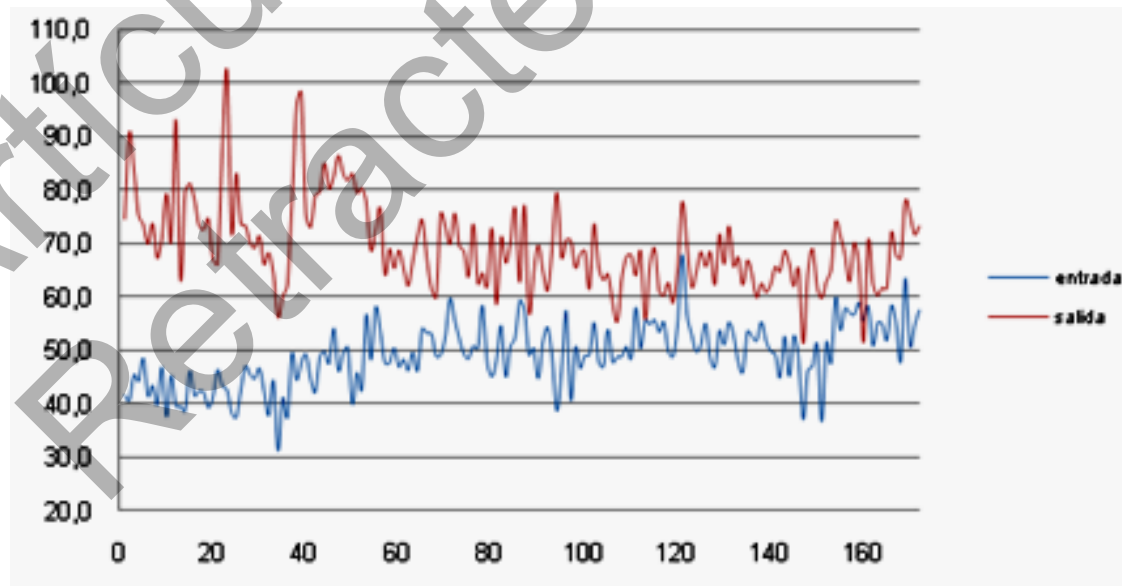


Figura 5. Valores de oxígeno disuelto a la entrada y a la salida del tratamiento

Como consecuencia de los oxidantes generados durante el tratamiento, y aunque el enfoque de la aplicación fue directamente dirigido a la desinfección, también se produjo una disminución del contenido de materia orgánica por oxidación de la misma resultando CO_2 y H_2O . Esto queda reflejado en los valores de DBO5 (figura 6) y DQO (figura 7) que se mostraron durante el tratamiento donde se puede ver que la DBO5 se redujo en una media de un 58,04% y la DQO se redujo en una media del 43,2% lo que tuvo un efecto directo sobre la coloración de las muestras recogidas.

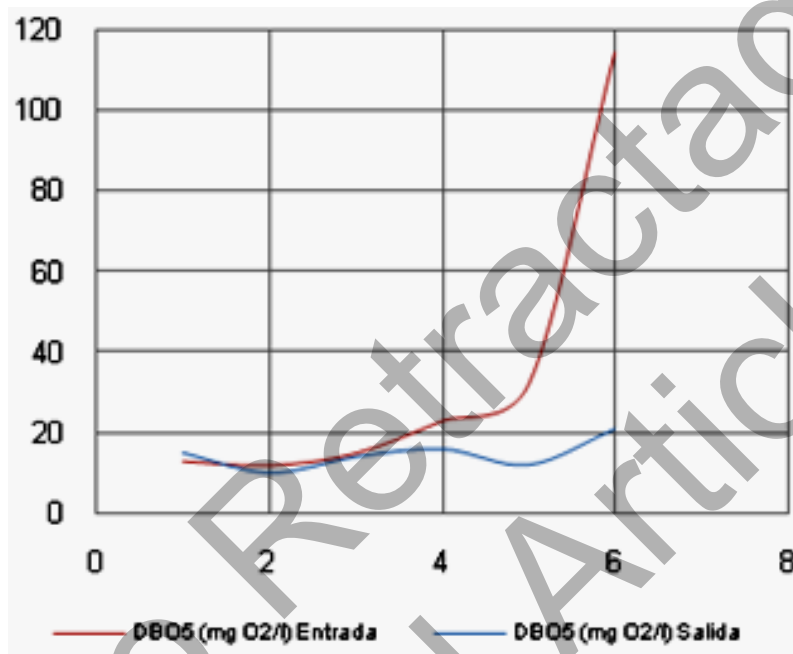


Figura 6. Valores de DBO5 a la entrada y salida del tratamiento

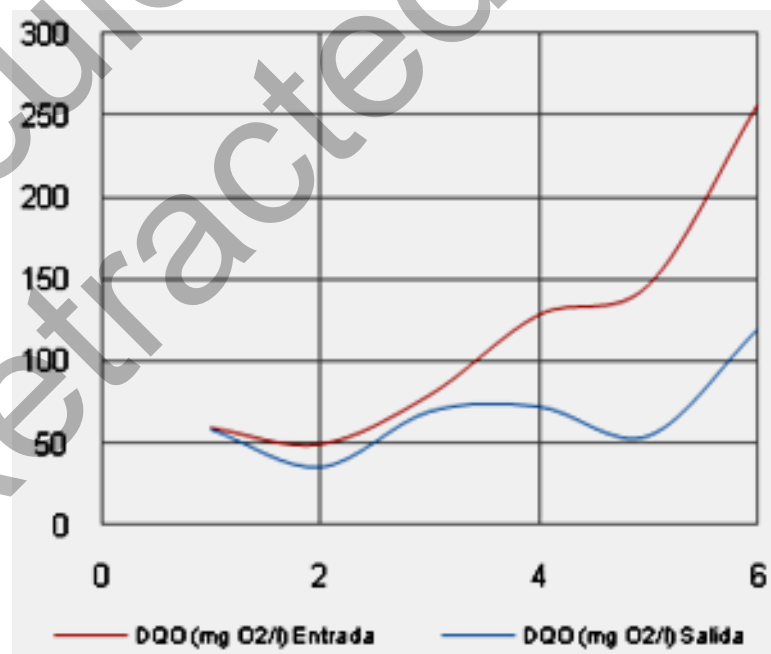


Figura 7. Valores de DQO a la entrada y salida del tratamiento

Cloro libre

En ningún momento se observó presencia de cloro libre en el agua bruta, por lo que todo lo detectado en el efluente fue de origen electroquímico. Durante los primeros días de tratamiento el cloro libre se evaluó con un test colorimétrico para piscinas resultando valores no muy precisos que oscilaron entre 1,5 y 3 ppm de cloro. Posteriormente, se pasó a medir el cloro libre mediante espectrofotometría resultando valores que oscilaron entre 2,9 y 4,6 ppm. Los valores medidos se recogen en la tabla 3.

Aunque el pH medio durante el tratamiento fue de 6,85 las mediciones máximas de cloro libre (4,66 y 4,51 ppm) tuvieron lugar en el último día medido, durante el cual se registraron también los mayores valores de pH (7,75 y 7,58). Se puede observar en la figura 8 la correlación existente entre el aumento de pH y el aumento de cloro libre, lo que indica la tendencia de compensación del efecto del pH mediante la producción de cloro libre por parte de los sistemas electroquímicos.

Tabla 3. Valores de cloro libre y pH en efluente

Nº Medición	Cloro libre	pH
1ª Medición	1,5 – 3	6,85
2ª Medición	3,46	7,36
	2,9	7,42
3ª Medición	3,84	7,65
	3,9	7,44
4ª Medición	4,6	7,75
	4,51	7,58

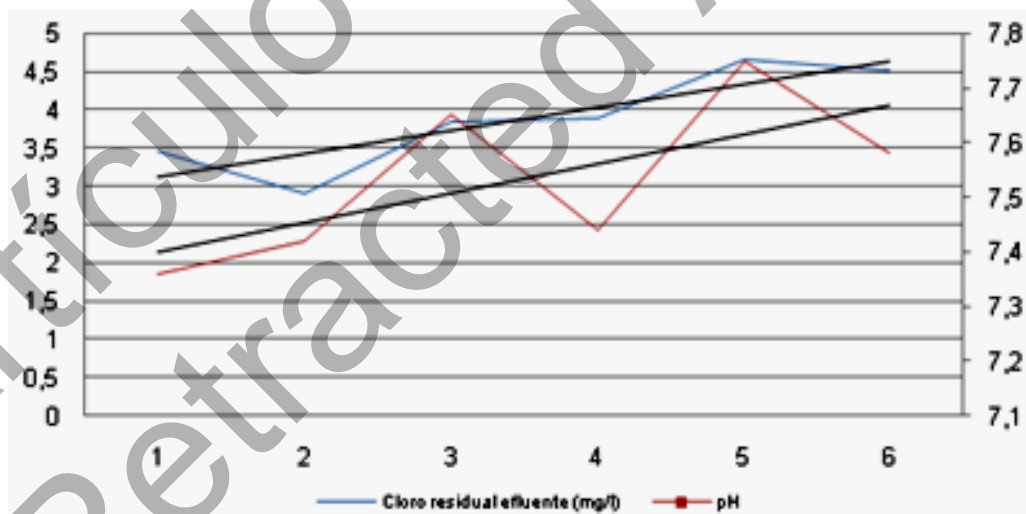


Figura 8. Cloro y pH en efluente con representación de líneas de tendencia

Inactivación de Escherichiacoli

Salvo en dos ocasiones en las que se detectaron 3 y 1 UFC/100 ml coincidentes con muestras analizadas *in situ*, los resultados en el efluente mostraron con independencia de los valores en la entrada una completa desinfección, tal y como se muestra en la tabla 4 y en la figura 9. La media

de la reducción porcentual detectada fue del 99,99% lo que supone según el concepto logarítmico de inactivación microbiológica una inactivación de log 4 (Machado et al. 2010).

Tabla 4. Resultados microbiológicos

Escherichiacoli (ufc/100ml)			
Entrada	Salida	Diferencia	Porcentaje Reducción
2,00E+03	0	2,00E+03	100,00
3,80E+03	0	3,80E+03	100,00
1,80E+04	0	1,80E+04	100,00
7,50E+03	0	7,50E+03	100,00
6,80E+03	0	6,80E+03	100,00
3,00E+03	0	3,00E+03	100,00
4,00E+03	0	4,00E+03	100,00
7,20E+03	0	7,20E+03	100,00
5,50E+04	3	5,50E+04	99,99
9,00E+03	0	9,00E+03	100,00
4,00E+03	0	4,00E+03	100,00
7,00E+03	1	7,00E+03	99,99
2,70E+04	0	2,70E+04	100,00
1,40E+04	0	1,40E+04	100,00
8,00E+03	0	8,00E+03	100,00

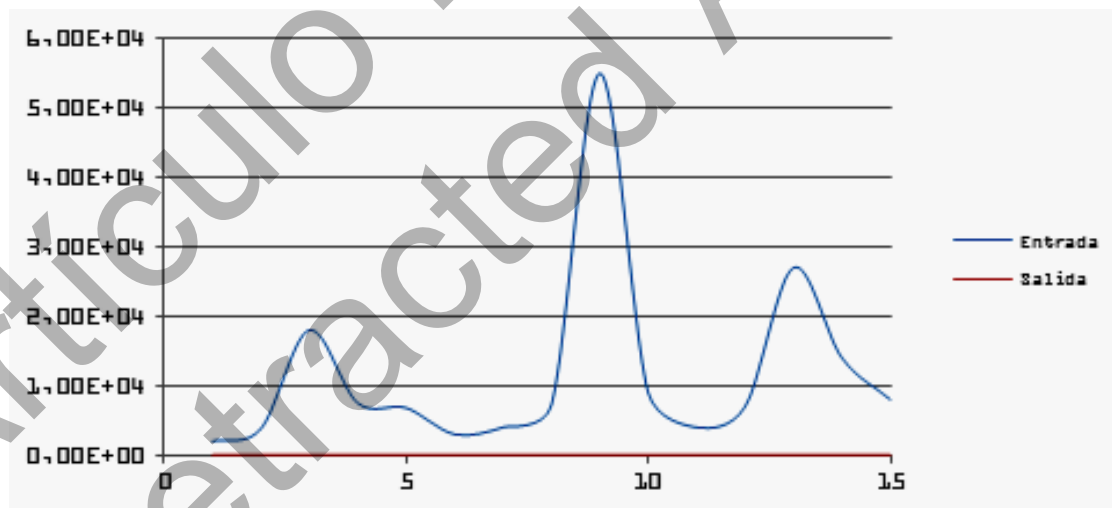


Figura 9. Comparación de Escherichiacoli antes y después del tratamiento

Estadística

Por término medio, las mediciones de salida de pH y Escherichiacoli fueron inferiores a las mediciones de entrada. En cambio, el porcentaje de oxígeno disuelto y ORP mostraron valores superiores tras el tratamiento mediante sistema electroquímico.

Tabla 5. Análisis descriptivo de los parámetros indirectos y microbiológicos

Variable		Mediciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica	Valor P ⁽²⁾
pH	Entrada	10	6,71	7,23	6,93	0,18	
	Salida	10	6,64	7,12	6,86	0,15	
	Diferencia ⁽¹⁾	10	-0,15	-0,03	-0,07	0,04	0,006
OD	Entrada	10	46,88	55,88	51,21	3,17	
	Salida	10	63,55	80,64	68,12	5,10	
	Diferencia ⁽¹⁾	10	9,09	33,67	16,91	6,65	0,002
ORP	Entrada	10	-11,19	5,94	2,26	4,87	
	Salida	10	-6,86	32,37	10,85	10,06	
	Diferencia ⁽¹⁾	10	2,36	28,59	8,59	7,71	0,002
E.Coli	Entrada	9	2900,00	22666,67	10574,07	7053,27	
	Salida	9	0,00	1,00	0,17	0,35	
	Diferencia ⁽¹⁾	9	-22665,67	-2900	-10573,9	7052,99	0,004
⁽¹⁾ Diferencia=valor de salida-valor de entrada. Marca la desviación del valor de salida con respecto al de entrada por término medio. ⁽²⁾ Significación estadística para la diferencia en la distribución de mediciones a la entrada y a la salida del sistema electroquímico, según el test de <i>Wilcoxon</i> para muestras relacionadas. La diferencia se considera significativa cuando el valor P es inferior a 0,05.							

Los niveles de pH a la salida del sistema de depuración fueron menores que los valores de entrada en todas las mediciones. Esta disminución de los niveles de pH tras la depuración del agua fue de similar magnitud en la mayoría de las mediciones. Sin embargo, el primer y el último día del periodo de estudio, fueron los que mostraron mayor descenso. En cualquier caso y por término medio, el pH de salida fue 0,07 unidades inferior que el pH de entrada y la diferencia entre las distribuciones de ambas mediciones fue estadísticamente significativa.

El porcentaje de oxígeno disuelto a la salida del sistema de depuración fue mayor que el valor de entrada para todas las mediciones. El primer día de medición fue el que registró mayor diferencia entre los valores de entrada y de salida del sistema electroquímico. Por término medio, el oxígeno disuelto en agua a la salida fue 16,91 puntos porcentuales superior que el oxígeno de entrada y la diferencia entre las distribuciones de ambas mediciones fue estadísticamente significativa.

Todas las mediciones de ORP en agua a la salida del sistema de depuración mostraron valores superiores a los obtenidos en la entrada aunque el primer día de medición fue el que presentó mayor diferencia entre los niveles de entrada y salida. Por término medio, el ORP de salida fue 8,59 unidades superior al ORP de entrada y la diferencia entre las distribuciones de ambas mediciones también fue estadísticamente significativa.

Los valores de *Escherichiacoli* a la salida del sistema electroquímico fueron muy inferiores a los obtenidos a la entrada, siendo cero en casi todas las mediciones finales y suponiendo una media del 99,99% de reducción. Por término medio, los valores de *Escherichiacoli* a la salida fueron 10573,91 unidades inferiores a los de entrada y la diferencia entre las distribuciones de ambas mediciones fue estadísticamente significativa.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos demostraron que las diferencias entre la entrada y la salida del tratamiento fueron significativas para todos los indicadores estudiados y que, por lo tanto, los sistemas electroquímicos resultan un tratamiento de desinfección eficaz frente a *Escherichiacoli* en efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales.
- La explicación de la eficacia presentada por los sistemas electroquímicos en la desinfección de *Escherichiacoli* debe atribuirse a la combinación de acciones biocidas, ya que a pesar de que el agua a tratar presentó un nivel abundante de cloruros disueltos, lo que permitió producir y mantener una elevada dosis de cloro libre en el depósito, la variabilidad en los valores de pH registrados y el cloro producido no justifican la constante inactivación de log4 obtenida.
- Se ha visto que los valores de ORP registrados a la salida del tratamiento no pudieron haber logrado la inactivación en los 12 minutos de tiempo de retención y que, en realidad; los valores alcanzados fueron consecuencia del ORP aplicado entre ánodo y cátodo en el interior de los reactores, lo que efectivamente presentó acción biocida por electroporación y oxidación directa de los grupos amino de las porinas. No obstante esta acción biocida, al ser dependiente de la aplicación de los pulsos necesarios sobre las bacterias para lograr su inactivación, tampoco justifica el 99,99 % de inactivación logrado.
- Todo esto permite corroborar que la eficacia desinfectante de la tecnología electroquímica se basa en la suma de múltiples acciones biocidas, lo que le confiere la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones sin necesidad de aditivar productos químicos ni sales. De este modo, la desinfección de agua mediante esta tecnología es posible tanto en recirculación como en línea y en muy diversos tipos de aguas.

REFERENCIAS

Arihara K., Terashima C. and Fujishima A. (2007). "Electrochemical production of high-concentration ozone-water using freestanding perforated diamond electrodes", *Journal of Electrochemistry Society*, volume 154, issue 4, pages 71–75. American Electrochemical Society Publisher, New Jersey, USA.

Bergmann M. and Koparal A. (2005). "Studies on electrochemical disinfectant production using anodes containing RuO₂", *Journal of Applied Electrochemistry*, volume 35, issue 12, pages 1321-1329. Springer Netherlands Publisher. New York, USA.

Kelley D. (2004). "Chlorine disinfectants and ORP control", Washington Tree Fruit Postharvest Conference, Washington, USA. Extraído de: <http://postharvest.tfrec.wsu.edu/PC2004B.pdf>. Consultado julio 2013.

Kraft A. (2008). "Electrochemical water disinfection: a short review". *Platinum metals Rev.*, volume 52, issue 3, pages 177-185. Published by Johnson Matthey Plc., Royston, UK.

Machado L., Pereira R., Martins R., Teixeira J. and Vicente A. (2010). “Moderate electric fields can inactivate *Escherichia coli* at room temperature”, *Journal of Food Engineering*, volume 96, page 520. Elsevier, Washington, USA.

Matsuki N., Ishikawa T., Imai Y. and Yamaguchi T. (2008). “Low voltage pulses can induce apoptosis”, *Journal Cancer Letters.*, volume 269, issue 1, pages 93-100. Elsevier. Heidelberg, Germany.

Min C., Hyenmi C., Wonyong C. and Jeyong Y. (2004). “Linear correlation between inactivation of *E. Coli* and OH radical concentration in TiO_2 photocatalytic disinfection”, *Journal Water research*, volume 38, issue 1, pages 1069-1077. Elsevier. London, UK.

Simpson R., Whittington R., Earnshaw R. and Russell N. (1999). “Pulsed high electric fields causes all or nothing membrane damage in *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium*, but membrane H^+ -ATPase is not a primary target”. *International Journal of Food Microbiology*, volume 48, issue 1, pages 1-10. Elsevier. USA.

Suslow T. (2004). “Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation”, University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Publication 8149. California, USA.

Wouters P., Álvarez I. and Raso J. (2001). “Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric fields food processing”. *Journal Trends in Food Science & Technology*, volume 12, issue 3-4, pages 112-121. Elsevier. Wageningen, The Netherlands.