

Evaluación del uso de la radiación UV y ozono en la degradación de algunas sulfonamidas

Yesmmy Karine Álvarez-Gómez¹, Ana María Cruz-González², Daniel Ricardo Delgado^{3*}

¹ Institución Educativa Aquilino Bedoya, Pereira, Risaralda, Colombia

² Sifati Group Ingeniería S.A.S., Grupo de Investigaciones Ciencia, Ingeniería e Innovación, Palermo, Huila, Colombia

³ Programa de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación de Ingenierías UCC-Neiva, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Neiva, Calle 11 No. 1-51, 410010, Neiva, Huila, Colombia

*Autor de correspondencia: danielr.delgado@campusucc.edu.co

Recibido: 18 de abril de 2023

Revisado: 20 de octubre de 2023

Aceptado: 30 de octubre de 2023

RESUMEN

Introducción: los antibióticos en el medio acuático son un problema importante debido a la aparición de resistencia bacteriana. Se desconoce el impacto ecológico a largo plazo en el medio ambiente acuático. Muchas fuentes permiten la entrada de antibióticos al medio ambiente, incluidas las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), la escorrentía agrícola, los efluentes hospitalarios y los lixiviados de vertederos. **Objetivo:** se presenta un estudio que evalúa la degradación de la sulfadiazina (SD), sulfamerazina (SMR) y sulfametazina (SMT) al ser expuesta a condiciones de estrés por radiación UV, ozonificación y UV + ozonificación. **Metodología:** todos los análisis se realizaron mediante espectrofotometría UV/Vis luego de verificar mediante análisis de HPLC que los productos de degradación no interferían de manera significativa la absorbancia de los fármacos en estudio. **Resultados:** se demostró que las tres sulfonamidas son sensibles a todos los métodos de degradación estudiados, siendo el método más eficiente la combinación de radiación UV+O₃, y el menos eficiente el tratamiento con ozono.

Palabras clave: contaminantes emergentes, fármacos, tratamiento de aguas, ozonización, radiación UV.

SUMMARY

Evaluation of the use of UV radiation and ozone in the degradation of some sulfonamides

Introduction: antibiotics in the aquatic environment are an important problem due to the emergence of bacterial resistance. The long-term ecological impact on the aquatic environment is unknown. Many sources allow antibiotics to enter the environment, including wastewater treatment plants (WWTPs), agricultural runoff, hospital effluent, and landfill leachate. **Objective:** a study is presented that evaluates the degradation of sulfadiazine (SD), sulfamerazine (SMR) and sulfamethazine (SMT) when exposed to stress conditions due to UV radiation, ozonation and UV + ozonation. **Methodology:** all analyzes were performed by UV/Vis spectrophotometry after verifying by HPLC analysis that the degradation products did not significantly interfere with the absorbance of the drugs under study. **Results:** it was shown that the three sulfonamides are sensitive to all the degradation methods studied, the most efficient method being the combination of UV+O₃ radiation, and the least efficient being the treatment with ozone.

Keywords: emerging contaminants, drugs, water treatment, ozonation, UV radiation.

RESUMO

Avaliação do uso da radiação UV e do ozônio na degradação de algumas sulfonamidas

Introdução: antibióticos no ambiente aquático são um problema importante devido ao surgimento de resistência bacteriana. O impacto ecológico a longo prazo no ambiente aquático é desconhecido. Muitas fontes permitem que antibióticos entrem no meio ambiente, incluindo estações de tratamento de águas residuais (ETEs), escoamento agrícola, efluentes hospitalares e lixiviados de aterros sanitários. **Objetivo:** é apresentado um estudo que avalia a degradação da sulfadiazina (SD), sulfamerazina (SMR) e sulfametazina (SMT) quando expostas a condições de estresse devido à radiação UV, ozonização e UV + ozonização. **Metodologia:** todas as análises foram realizadas por espectrofotometria UV/Vis após verificação por análise de HPLC que os produtos de degradação não interferiram significativamente

na absorbância dos fármacos em estudo. **Resultados:** foi demonstrado que as três sulfonamidas são sensíveis a todos os métodos de degradação estudados, sendo o método mais eficiente a combinação da radiação UV+O₃, e o menos eficiente o tratamento com Ozônio.

Palavras-chave: contaminantes emergentes, drogas, tratamento de água, ozonização, Radiação UV.

INTRODUCCIÓN

Además de tratamiento de patologías en humanos, los antibióticos se utilizan en sectores como la acuicultura, la agricultura y la veterinaria [1, 2], lo cual ha causado un aumento de la presencia de estas sustancias en aguas superficiales [3-5].

Se esperaría que una vez ingeridos, los antibióticos sean totalmente metabolizados, sin embargo, una fracción de los mismos es excretados sin cambios [5-8]. Así, inicialmente, una vez los antibióticos lleguen al sistema de drenajes y posterior entrada a plantas de tratamiento (PTAR) pueden tener tres destinos: Biodegradación, adsorción en lodos o salida sin cambios [9-11], por lo cual tanto la principal entrada de antibióticos a los ecosistemas acuáticos es la fracción no metabolizada que pasa a través de las PTAR sin sufrir cambios, debido a que los sistemas de tratamientos no cuentan con tecnologías que eliminen completamente los antibióticos [12].

Otras fuentes de contaminación por antibióticos son los lixiviados vertederos de basura y la eliminación inadecuada de medicamentos no consumidos [13, 14], al ingresar al medio ambiente, el destino de los antibióticos está condicionado a las propiedades físico-químicas del medio, como pH, composición del suelo, además de las condiciones ambientales del entorno, teniendo el potencial de transformarse en metabolitos lo que dificulta predecir el comportamiento y destino final de los antibióticos [6, 13].

Los antibióticos se clasifican de manera general en agentes bactericidas y agente bacteriostáticos, los primeros destruyen las bacterias y los bacteriostáticos evitan la proliferación bacteriana impidiendo su división [15].

Dentro del grupo de los agentes bactericidas, las sulfonamidas (Figura 1) son unos de los antibióticos más utilizados sobre todo en medicina veterinaria; sin embargo, debido al aumento de la resistencia bacteriana a los antibióticos de primera línea, las sulfamidas han vuelto a tomar protagonismo en tratamientos en humanos [16, 17], lo que a su vez ha generado alertas ambientales por la presencia de estos fármacos en sistemas

acuáticos, a tal punto que organizaciones como la red NORMAN, haya clasificado a la Sulfadiazina (SD), la sulfamerazina (SMR) y la sulfametazina (SMT) como contaminantes emergentes de alta peligrosidad ambiental [18].

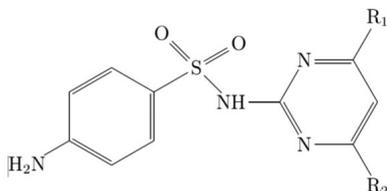


Figura 1. Formula química de las sulfonamidas (Sulfadiazina: R₁: H, R₂: H; Sulfamerazina: R₁: CH₃, R₂: H; Sulfametazina R₁: CH₃, R₂: CH₃).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es evaluar el uso de la radiación UV y el ozono en la degradación de la SD, SMR y SMT como alternativa de tratamiento adicional de aguas residuales, dos métodos de bajo costo y de fácil implementación en PTAR ya construidas.

METODOLOGÍA

Reactivos

Sulfadiazina, sulfamerazina y sulfametazina (Sigma-Aldrich), Metanol, Etanol (Merck), Acetonitrilo (Merck). Agua destilada

Equipos

Espectrofotómetro UV-Vis (EMC-11-UV), Equipo de HPLC (Agilent 1200 Series), con automuestrador Agilent 1260 Infinity, desgasificador Agilent 1200 Series, bomba cuaternaria Agilent 1200 Series, Detector UV-Vis con arreglo de diodos e integrados Agilent 1200 Series, Columna Eclipse XDB-C18 (150 mm × 4,6 mm, 3,5-5 μm). Reactor ozono, Lámpara UV ECOFILTER, bomba de recirculación, Baño de recirculación (Medingen K22/T100), Balanza analítica (RADWAG AS 220.R2, sensibilidad ±0,1 mg).

Evaluación de técnicas en la degradación de fármacos

Se preparó una solución acuosa de 25 μg/mL de cada una de las sulfonamidas evaluadas (SD, SMR y SMT) teniendo en cuenta la solubilidad de cada fármaco a 20 °C (Temperatura de laboratorio 25 °C) garantizando una sola fase [19-23]

Cada fármaco fue sometido a tres métodos de degradación 1) Radiación UV, 2) Ozonificación y 3) Radiación UV + O₃. Para el primer análisis, en un erlenmeyer de 1000 mL se tomaron 500 mL de cada una de las soluciones, los cuales fueron recirculados continuamente por un sistema comercial de lámpara de luz ultravioleta, el cual consiste en un contenedor de acero inoxidable de 52 cm de largo por 7 cm de diámetro, con dos conexiones de ½ pulgada, el cual contiene en su interior un tubo de vidrio de 46 cm de largo y 2,5 cm de diámetro el cual a su vez contiene una lámpara que irradia luz UV entre 200 y 295 nm de acuerdo a especificaciones comerciales. El segundo análisis, en un frasco de color ámbar de capacidad de 1000 mL, se depositaron 500 mL de cada una de las soluciones y se burbujeo ozono mediante un generador ozono, finalmente para el tercer ensayo, se acopló el generador de ozono al sistema de lámpara UV y se recirculó la solución de cada una de las sulfonamidas estudiadas [24].

La degradación de cada uno de los fármacos se evaluó contrastando la concentración de la solución de cada sulfonamida en función del tiempo de exposición a cada uno de los factores, es decir luz UV, ozono, y UV + ozono. Debido a que la exposición de las sulfonamidas a la radiación UV y/o al ozono puede generar productos de degradación que interfieran en la cuantificación del fármaco, se evaluaron dos técnicas para la determinación del cambio de concentración. La primera técnica de cuantificación fue HPLC, se determinó la concentración cada muestra de muestras sometidas a radiación + ozonificación durante 5, 15, 30 y 60 minutos a 268 nm, evaluando la altura de pico, el tiempo de retención y la pureza de pico.

La segunda técnica analítica, fue la de espectrofotometría UV-Vis, una técnica rápida, sencilla y que requiere menos recursos en comparación al HPLC, sin embargo, no es posible identificar de forma precisa la interferencia de posibles productos de degradación. En este ensayo la concentración se determinó a 268 nm sin realizar diluciones de acuerdo al método reportado por Delgado *et al.* [25].

Condiciones HPLC

Se empleó un cromatógrafo líquido modular Agilent 1200 Series, con automuestreador Agilent 1260 Infinity, desgasificador Agilent 1200 Series, bomba cuaternaria Agilent 1200 Series, detector UV/VIS con arreglo de diodos e integrador Agilent 1200 Series, así como una columna Eclipse XDB-C18 (4,6 mm × 150 mm, 3,5-5 μm) cuya temperatura de operación fue de 25 °C. El volumen de inyección fue de 10 μL; la fase móvil utilizada fue sistema de gradiente lineal de dos solventes con agua/acetoneitrilo, ambos con ácido trifluoroacético (TFA) al 0,05% cuya composición de partida fue 90/10 a cero minutos, luego se cambió a 85/15 a los diez minutos. La velocidad de flujo fue de 2,5 mL/min, y la longitud de onda de cuantificación fue de 268 nm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La degradación de cada una de las sulfonamidas se evaluó analizando los cambios de concentración en función del tiempo de exposición de cada fármaco a las diferentes condiciones de estrés. En principio, para evaluar el uso de espectrofotometría UV en el análisis de degradación se realizó un estudio de degradación mediante radiación UV + ozonificación, la cuantificación de cada fármaco se realizó mediante HPLC con el fin de identificar posibles interferencias de los productos de degradación en la cuantificación. Así, se tomó una solución de 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de cada sulfonamida y se sometió a estrés por radiación UV + Ozonificación.

En la tabla 1 se muestran los resultados, a partir de los cuales se pudo demostrar que los tres fármacos son sensibles a radiación UV + Ozonificación, puesto que a medida que aumenta el tiempo de exposición el área de pico se reduce manteniendo el tiempo de retención, indicando degradación del fármaco, en los primeros 5 minutos de exposición a radiación UV y ozono, la SD, se degrada en un 12%, la SMR 21% y la SMT 17%, a los 15 minutos de exposición la SD aumenta su degradación a 28%, la SMR 37% y la SMT 33% siendo nuevamente la SMR el fármaco que presenta mayor porcentaje de degradación. A los 30 minutos, la SD alcanza el 57% de degradación, la SMR 63% y la SMT 53%, pasados 60 minutos, la SD se degrada 71%, la SMR 76% y la SMT 73%, demostrando la eficiencia del tratamiento UV + Ozonificación en la degradación de los tres fármacos; otro análisis importante es la pureza de pico, la cual en el caso de la SD pasa de 99,9% a 98,7% variando tan solo 1,2%, en cuanto al SMR, factor de pureza de pico varía 1,1% y en la SMT 1,6%, porcentajes que permiten concluir que los productos de degradación no interfieren de forma significativa en la cuantificación del fármaco luego de someterlo a estrés por radiación UV + Ozonificación, por lo que el estudio de degradación por radiación UV, O₃, o ambas técnicas combinadas, puede realizarse mediante espectrofotometría UV-Vis. Si bien mediante espectrofotometría UV-Vis o HPLC no es posible identificar los productos de degradación, García-Galán *et al.* indican que muchos de estos productos de degradación son el resultado de la ruptura de los anillos aromáticos por lo que no tienen grupos cromóforos que permitan su cuantificación mediante técnicas espectrofotométricas [5], lo cual es respaldado por Li *et al.* [26].

Tabla 1. Áreas, tiempo de retención (TR) y factor de similitud o de pureza de pico del estándar de cada sulfonamida y de las muestras expuestas a condiciones de estrés (radiación UV + Ozonificación; solución 25 µg/mL).

Fármaco	Tiempo de exposición /minutos	Área /mAU	Tiempo de retención	Pureza de pico
Sulfadiazina	0	745	3,52	999,21±0,85
	5	652	3,41	995,25±0,58
	15	532	3,65	992,54±0,25
	30	321	3,55	989,14±0,21
	60	213	3,42	987,15±0,12
Sulfamerazina	0	801	4,32	999,78±0,75
	5	625	4,21	997,45±0,32
	15	502	4,35	993,47±0,95
	30	298	4,42	990,64±0,75
	60	189	4,25	988,85±0,37
Sulfametazina	0	754	5,12	999,56±0,28
	5	625	5,21	996,18±0,24
	15	498	5,24	991,75±0,69
	30	351	5,28	985,72±0,74
	60	201	5,32	983,78±0,45

Evaluación de métodos de degradación

Se analizaron tres métodos para degradar las sulfonamidas, el primero consistió en irradiar la muestra mediante una lámpara de UV, recirculando la muestra mediante una bomba a una rapidez de flujo 4 L/min, por entre un reactor UV; el segundo método, consistió en burbujear O₃ a la muestra y el tercer método consistió en una técnica combinada de radiación UV + O₃.

En todos los casos se tomaron 500 mL de solución de 25 µg/mL de cada una de las sulfonamidas estudiadas. Cada muestra se sometió a estrés durante 80 minutos, una vez se inició el proceso de degradación se tomaron muestras cada 5 minutos durante los primeros 30 minutos y cada 10 minutos durante los restantes 50 minutos.

En la Figura 2, se muestra el porcentaje de degradación en función del tiempo, el tratamiento con ozono, mostró ser el método menos eficiente, sin embargo, la SMR y SMT alcanzan porcentajes de degradación cercanos al 50%, y en cuanto a la SD solo se logra degradar aproximadamente un 30%.

Al irradiar las muestras con luz ultravioleta, se alcanzan porcentajes de degradación entre 62-65%, mayores a las alcanzadas mediante burbujeo de ozono en donde el porcentaje de degradación no supera el 50% para la SMR y SMT y tan solo llega a un 30% en la SD, sin embargo, al someter las muestras a la técnica combinada UV + O₃ el porcentaje de degradación de las tres sulfonamidas alcanzan valores entre el 80 y el 83%. Al analizar el porcentaje de degradación de las tres sulfonamidas en función de su estructura molecular solo se notan diferencias en el tratamiento por O₃, posiblemente debido a que la longitud de onda de máxima absorbancia de las tres sulfonamidas es similar (263-264 nm), por lo que en los métodos de radiación UV y UV + O₃ los resultados sean mas homogéneos en relación al tratamiento por O₃.

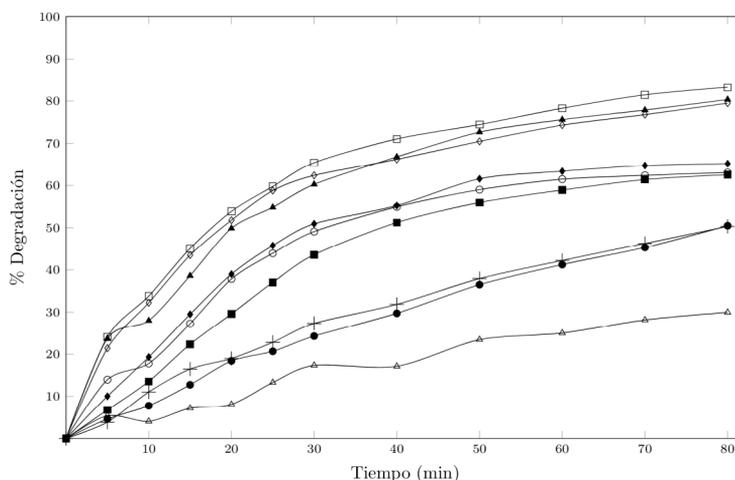


Figura 2. Porcentaje de degradación de la SD (Δ: Ozono, ○: Radiación UV, ◇: Radiación UV + Ozono.) SMR (●: Ozono, ◆: Radiación UV, □: Radiación UV + Ozono.) SMT (+: Ozono, ▴: Radiación UV, ▲: Radiación UV + Ozono).

Al determinar la cinética de degradación (Tabla 2, Figura 3) se puede establecer que el mejor orden que describe la degradación de las sulfonamidas es la cinética de orden 2. Indicando dos principios importantes, el primero es que la velocidad de degradación depende la concentración inicial, y el segundo, la vida media de los agentes terapéuticos aumenta a medida que la concentración disminuye, es decir, para eliminar trazas es necesario mayor tiempo de tratamiento [27].

Esto demuestra la dificultad relacionada con la eliminación total de estos fármacos, más aún cuando se ha demostrado que concentraciones del orden de 2,9 ng/mL presentan efectos biológicos graves [1, 28-30].

Al verificar los datos de r^2 para la cinética de las sulfonamidas expuesta a radiación UV, se observa un posible pseudo orden 2, a diferencia de los tratamientos con ozono y radiación UV + O₃ en donde se obtienen tendencias lineales con r^2 aproximados a 1,0 conservándose claramente una cinética de orden 2.

Tabla 2. Cinética de degradación de la SD, SMR y SMT expuestas a diferentes condiciones de estrés.

Tratamiento	Sulfonamida	Ecuación	R ²
Ozono	SD	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00022 \tau(\text{min}) + 0,04027$	0,9794
	SMR	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00050 \tau(\text{min}) + 0,03860$	0,9933
	SMT	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00050 \tau(\text{min}) + 0,03962$	0,9982
Radiación UV	SD	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00093 \tau(\text{min}) + 0,04447$	0,9495
	SMR	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00103 \tau(\text{min}) + 0,04384$	0,9560
	SMT	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00092 \tau(\text{min}) + 0,04004$	0,9796
Radiación UV + O ₃	SD	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00189 \tau(\text{min}) + 0,04323$	0,9953
	SMR	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00249 \tau(\text{min}) + 0,03765$	0,9981
	SMT	$1/C(\mu\text{g/mL}) = 0,00207 \tau(\text{min}) + 0,03819$	0,9976

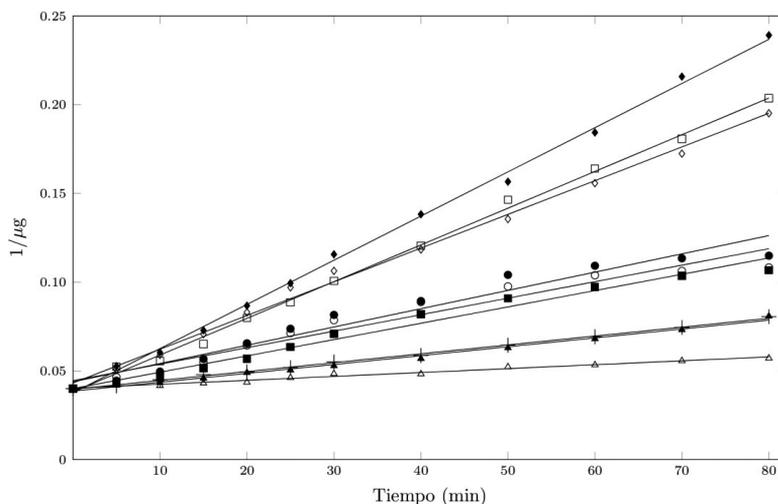


Figura 3. Cinética de degradación de la SD (Δ : Ozono, \circ : Radiación UV, \diamond : Radiación UV + Ozono.) SMR (\blacktriangle : Ozono, \bullet : Radiación UV, \square : Radiación UV + Ozono.) SMT ($+$: Ozono, \blacksquare : Radiación UV, \blacklozenge : Radiación UV + Ozono).

CONCLUSIONES

Las tres sulfonamidas son sensibles a la degradación por radiación y ozono, en todos los casos, se muestra un mínimo del 50% de degradación en un lapso de tiempo de 80 minutos. El método de tratamiento menos eficiente es la ozonificación sin embargo al combinar este método con radiación UV se obtienen mejores resultados.

Si bien los tres métodos permiten degradar las sulfonamidas (SD, SMR y SMT), el que el proceso siga un orden cinético de segundo orden sugiere que la eliminación del 100% de residuos de estos fármacos es un proceso complejo, puesto que la vida media de los fármacos aumentaría a medida que su concentración disminuye como consecuencia de la degradación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no presentar ningún conflicto de interés

REFERENCIAS

1. J. Harrower, M. McNaughtan, C. Hunter, R. Hough, Z. Zhang, K. Helwig, Chemical fate and partitioning behavior of antibiotics in the aquatic environment—A review, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **40**(12), 3275–3298 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/etc.5191>
2. K. Kümmerer, Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I, *Chemosphere*, **75**(4), 417–434 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
3. D.I. Caviedes-Rubio, D.R. Delgado, Regulación ambiental sobre los productos farmacéuticos residuales en ambientes acuáticos, *Entornos*, **28**(1), 76–80 (2015). <https://doi.org/10.25054/01247905.1225>
4. D.I. Caviedes-Rubio, D.R. Delgado, A. Olaya-Amaya, Normatividad ambiental dirigida a regular la presencia de los productos farmacéuticos residuales en ambientes acuáticos, *Revista Jurídica Piélagus*, **16**(1), 121–130 (2017). <https://doi.org/10.25054/16576799.1445>

5. M.J. García-Galán, M. Silvia Díaz-Cruz, D. Barceló, Identification and determination of metabolites and degradation products of sulfonamide antibiotics, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **27**(11), 1008–1022 (2008). <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2008.10.001>
6. I. Gozlan, A. Rotstein, D. Avisar, Amoxicillin-degradation products formed under controlled environmental conditions: Identification and determination in the aquatic environment, *Chemosphere*, **91**(7), 985–992 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.095>
7. C.P. Ortiz, R.E. Cardenas-Torres, M. Herrera, D.R. Delgado, Numerical analysis of sulfamerazine solubility in acetonitrile + 1-propanol cosolvent mixtures at different temperatures, *Sustainability*, **15**(8), 6596 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15086596>
8. C.P. Ortiz, R.E. Cardenas-Torres, M. Herrera, D.R. Delgado, Thermodynamic analysis of the solubility of propylparaben in acetonitrile–water cosolvent mixtures, *Sustainability*, **15**(6), 4795 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15064795>
9. Y. Luo, W. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai, J. Zhang, S. Liang, X.C. Wang, A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Science of The Total Environment*, **473–474**, 619–641 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065>
10. C.E. Chen, H. Zhang, G.G. Ying, L.J. Zhou, K.C. Jones, Passive sampling: A cost-effective method for understanding antibiotic fate, behaviour and impact, *Environment International*, **85**, 284–291 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.001>
11. M.B. Ahmed, J.L. Zhou, H.H. Ngo, W. Guo, Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: Progress and challenges, *Science of The Total Environment*, **532**, 112–126 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.130>
12. I. Michael, L. Rizzo, C.S. McArdell, C.M. Manaia, C. Merlin, T. Schwartz, C. Dagot, D. Fatta-Kassinos, Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review, *Water Research*, **47**(3), 957–995 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.027>

13. B.A. Otoo, I.A. Amoabeng, G. Darko, L.S. Borquaye, Antibiotic and analgesic residues in the environment – Occurrence and ecological risk study from the Sunyani municipality, Ghana, *Toxicology Reports*, **9**, 1491–1500 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.07.003>
14. H. Luo, Y. Zeng, Y. Cheng, D. He, X. Pan, Recent advances in municipal land-fill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment, *Science of The Total Environment*, **703**, 135468 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>
15. N. Milić, M. Milanović, N.G. Letić, M.T. Sekulić, J. Radonić, I. Mihajlović, M.V. Miloradov, Occurrence of antibiotics as emerging contaminant substances in aquatic environment, *International Journal of Environmental Health Research*, **23**(4), 296–310 (2013). <https://doi.org/10.1080/09603123.2012.733934>
16. E.N. Krylov, M.S. Gruzdev, U.V. Chervonova, L.V. Virzum, Synthesis, reactivity, acidic and pharmaceutical properties of sulphonamides, en: D. Sarkar (editor), *Sulfonamides: An Overview*, Nova Science Publishers, Odisha, 2020.
17. D.R. Delgado, M.Á. Peña, F. Martínez, Preferential solvation of some sulfonamides in propylene glycol + water solvent mixtures according to the IKBI and QLQC methods, *Journal of Solution Chemistry*, **43**(2), 360–374 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10953-014-0130-2>
18. NORMAN network, NORMAN Substance Database, NORMAN Substance Database, 2023. URL: <https://www.norman-network.com/nds/susdat/> accesado el 16 de abril de 2023.
19. D.R. Delgado, *Estudio termodinámico de la solubilidad de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes*, Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2014. URL: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53095>, accesado el 25 de agosto de 2020.
20. D.R. Delgado, F. Martínez, Solution thermodynamics of sulfadiazine in some ethanol + water mixtures, *Journal of Molecular Liquids*, **187**, 99–105 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.06.011>
21. D.R. Delgado, F. Martínez, Solubility and solution thermodynamics of sulfamerazine and sulfamethazine in some ethanol + water mixtures, *Fluid Phase Equilibria*, **360**, 88–96 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.09.018>

22. D.R. Delgado, F. Martínez, Solution thermodynamics and preferential solvation of sulfamerazine in methanol + water mixtures, *Journal of Solution Chemistry*, **44**(2), 360–377 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10953-015-0317-1>
23. D.R. Delgado, O.A. Almanza, F. Martínez, M.A. Peña, A. Jouyban, W.E. Acree, Solution thermodynamics and preferential solvation of sulfamethazine in (methanol + water) mixtures, *Journal of Chemical Thermodynamics*, **97**, 264–276 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.JCT.2016.02.002>
24. Y.K. Álvarez-Gómez, D.R. Delgado, Y.K. Álvarez-Gómez, D.R. Delgado, Evaluación del uso de la radiación UV y ozono en la degradación de metilparabeno, *Revista de Ciencias Ambientales*, **57**(2), 1–17 (2023). <https://doi.org/10.15359/RCA.57-2.7>
25. D.R. Delgado, G. Rodríguez, J. Martínez, J. Rojas, F. Martínez, Validación de una metodología analítica empleando espectrofotometría ultravioleta para el estudio de la solubilidad de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes alcohol + agua, *Revista Colombiana de Química*, **42**(3), 31–40 (2013). URL: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/53429>, accesado el 10 de marzo de 2020.
26. J. Li, L. Zhao, M. Feng, C.H. Huang, P. Sun, Abiotic transformation and ecotoxicity change of sulfonamide antibiotics in environmental and water treatment processes: A critical review, *Water Research*, **202**, 117463 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117463>
27. L. Wu, Z. Wu, Y. Wang, L. Han, H. Mao, Z. Gu, The effect of chemical composition on the degradation kinetics of high molecular weight poly(trimethylene carbonate-co-L-lactide), *Polymer Degradation and Stability*, **206**, 110183 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110183>
28. V. Vishnu-Priyan, N. Kumar, H.K. Rajendran, J. Ray, S. Narayanasamy, Sequestration and toxicological assessment of emerging contaminants with polypyrrole modified carboxymethyl cellulose (CMC/PPY): Case of ibuprofen pharmaceutical drug, *International Journal of Biological Macromolecules*, **221**, 547–557 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.046>
29. J.C. Carrizo, S. Vo Duy, G. Munoz, G. Marconi, M.V. Amé, S. Sauvé, Suspect screening of pharmaceuticals, illicit drugs, pesticides, and other emerging contaminants in Argentinean *Piaractus mesopotamicus*, a fish species used for local consumption and export, *Chemosphere*, **309**(Part 1), 136769 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136769>

30. R. Wang, J. Luo, C. Li, J. Chen, N. Zhu, Antiviral drugs in wastewater are on the rise as emerging contaminants: A comprehensive review of spatiotemporal characteristics, removal technologies and environmental risks, *Journal of Hazardous Material*, **457**, 131694 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131694>

COMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Y. Álvarez-Gómez, A.M. Cruz-González, D.R. Delgado, Evaluación del uso de la radiación UV y ozono en la degradación de algunas sulfonamidas, *Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm.*, **52**(3), 1392-1405 (2023). <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v52n3.112482>