

Análisis de la disminución de concentración de diclofenaco en solución acuosa empleando ozono intensificado por cavitación hidrodinámica

Analysis of the decrease in diclofenac concentration in aqueous solution using ozone intensified by hydrodynamic cavitation

Samantha Vélez García¹, Yarid Sierra Dueñas², Cristhian Rafael Pérez Moreno³, Rafael Nikolay Agudelo Valencia⁴, Salvador Vargas Díaz⁵ y Gabriel de Jesús Camargo Vargas⁶

¹<https://orcid.org/0009-0007-8507-1359> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, samantha-velezg@unilibre.edu.co

²<https://orcid.org/0009-0003-3992-8324> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, yarid-sierrad@unilibre.edu.co

³<https://orcid.org/0009-0005-1948-0408> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, cristhianr-perez@unilibre.edu.co

⁴<https://orcid.org/0000-0002-6646-7725> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, rafaeln.agudelo@unilibre.edu.co

⁵<https://orcid.org/0000-0003-3689-2605> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, salvador.vargas@unilibre.edu.co

⁶<https://orcid.org/0000-0003-3721-0936> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, gabriel.camargov@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 03 de abril de 2025
Fecha de aprobación: 02 de junio de 2025
Fecha de publicación: 30 de junio de 2025



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.13281>

Citar como: S. Vélez, Y. Sierra, C. R. Pérez, R. N. Agudelo, S. Vargas y G. Camargo, "Análisis de la disminución de concentración de diclofenaco en solución acuosa empleando ozono intensificado por cavitación hidrodinámica," Avances: Investigación en Ingeniería, vol. 22, núm. 1, pp. 1-10, 2025, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.13281>

Resumen

Se analizó un sistema de cavitación hidrodinámica para intensificar la ozonización de diclofenaco presente en solución acuosa. Se empleó un generador de ozono con capacidad para producir 5 g de O₃/h. La cavitación hidrodinámica fue inducida a través de un tubo Venturi conectado a la salida de una bomba de 745,7 W de potencia y una presión de descarga de 0,41 MPa. El caudal impulsado por la bomba fue de 0,0005 m³/s, operando el sistema en recirculación completa. Se utilizó un diseño experimental central compuesto para determinar el efecto del pH inicial de la solución (4 y 7) y de la concentración inicial de diclofenaco (5 mg/L y 10 mg/L). Los resultados fueron evaluados mediante análisis de varianza, estableciéndose que las variables experimentales y sus interacciones hasta el segundo orden tiene efecto sobre la variable de respuesta, correspondiente al porcentaje de remoción de diclofenaco. La metodología de superficie de respuesta permitió identificar las condiciones para alcanzar el mayor porcentaje de remoción, logrando un 40% con un pH inicial de 4 y una concentración de diclofenaco de 5 mg/L. En todos los ensayos, el número de cavitación fue de 0,797, lo que confirma la formación de cavidades en el seno del líquido. El tiempo de reacción en cada prueba fue de 0,5 h. La efectividad del proceso bajo estas condiciones se atribuye principalmente a que el diclofenaco se encuentra en su forma no ionizada, cuya hidrofobicidad favorece su acumulación en la interfase de las cavidades formadas en la garganta del Venturi, donde es atacado por los radicales OH generados durante el colapso. Por otra parte, el efecto intensificador de la cavitación hidrodinámica en la ozonización puede explicarse por la mejora en la transferencia de masa del ozono al agua, gracias a la turbulencia en la garganta del Venturi, así como por la descomposición del ozono que genera radicales OH en el medio.

Palabras Clave: Cavitación Hidrodinámica, Diclofenaco, Oxidación Avanzada, Ozono.

Abstract

A hydrodynamic cavitation system was analyzed to intensify the ozonation of diclofenac present in aqueous solution. An ozone generator with a capacity of 5 g de O_3 /h was used. Hydrodynamic cavitation was induced through a Venturi tube connected to the outlet of a 745,7 W pump with a discharge pressure of 0,41 MPa. The flow rate driven by the pump was 0,0005 m³/s, and the system was operated in complete recirculation. A central composite experimental design was used to determine the effect of the initial pH of the solution (4 and 7) and the initial diclofenac concentration (5 mg/L y 10 mg/L). The experimental results were evaluated using analysis of variance, determined that the experimental variables and their interactions up to the second order affect the response variable, corresponding to the percentage of diclofenac removal. The response surface methodology allowed identifying the conditions to achieve the highest removal percentage, reaching 40% with an initial pH of 4 and a diclofenac concentration of 5 mg/L. In all test, the cavitation number was 0,797, which confirms the formation of cavities within the liquid. The reaction time in each of the experiments was 0,5 h. The effectiveness of the process under these conditions is mainly attributed to the fact that diclofenac remains in its non-ionized form, whose hydrophobicity favors its accumulation at the interface of the cavities formed in the Venturi throat, where it is attacked by the OH radicals generated during collapse. Furthermore, the intensifying effect of hydrodynamic cavitation on ozonation can be attributed to the improvement in the mass transfer of ozone into the water due to turbulence in the Venturi throat, as well as by the ozone decomposition that generates OH radicals in the medium.

Keywords: Advanced oxidation, Diclofenac, Hydrodynamic cavitation, Ozone.

1. Introducción

En las últimas décadas, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas causada por la descarga de compuestos farmacéuticos ha adquirido una creciente relevancia, no solo desde el punto de vista ambiental, sino también en términos de la salud pública. Los contaminantes de origen farmacéutico, junto con aquellos derivados de productos para el cuidado personal, se clasifican actualmente como contaminantes emergentes (CE) [1].

Entre estos, el diclofenaco (DCF) se ha posicionado como uno de los fármacos de mayor preocupación debido a su amplio uso en medicina humana y veterinaria [2]. El DCF es un antiinflamatorio no esteroideo (AINE) empleado en el tratamiento del dolor y la inflamación [3], con

un consumo global anual estimado en más de 1000 toneladas [4], de las cuales aproximadamente el 65% corresponde a dosis orales [2]. Tras su ingestión, cerca del 40% del compuesto es excretado por la orina y liberado hacia las aguas residuales municipales [5]. Una vez en el agua, el DCF puede afectar negativamente el hígado, los riñones y las branquias de los peces, además de provocar alteraciones endocrinas que comprometen su reproducción [6]. Pese al impacto del DCF sobre la fauna acuática, los microorganismos y en la salud de los seres humanos, no existen regulaciones específicas que limiten su concentración en descargas de aguas residuales o en cuerpos de agua naturales.

El desafío que representa la remoción de este tipo de contaminantes ha impulsado la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales. La eliminación de contaminantes emergentes se ha estudiado mediante distintas técnicas, entre ellas:

- Biodegradación en reactores de lecho fluidizado, con una tasa de remoción de 53% [5].
- Reactores de lodos activos, que pueden alcanzar un 80% de remoción [7].
- Fitorremediación con eficiencias de hasta 87,5% [8,9].
- Bioadsorción [10], que ha reportado una tasa de remoción del 72% [10].
- Tratamientos electroquímicos, los cuales, si bien no resultan eficaces frente al DCF de forma aislada, muestran buenos resultados para otros tipos de contaminantes [11].
- Nano filtración, que promete una notable eficiencia del 99,7% [12].
- Procesos de oxidación avanzada (POA), como la fotocátalisis, con una remoción del 35,12% [13]; el reactivo de fentón, capaz de remover el 98% del DCF en estudios de laboratorio [13]; el proceso foto-Fenton, con una degradación del $72,7\% \pm 4,9$ [15]; y los procesos sono-fotocatalíticos que también han mostrado resultados prometedores [16].

La cavitación hidrodinámica (CH) es un fenómeno en el que, debido a una disminución súbita de la presión local del fluido, se generan burbujas de vapor en el seno del líquido. Estas crecen y colapsan violentamente, generando temperaturas y presiones extremas en su interior, lo que favorece tanto la descomposición de contaminantes dentro de las cavidades como la formación de radicales reactivos al momento del colapso [17]. La eficiencia del proceso puede potenciarse mediante la adición de agentes intensificadores, como el peróxido de hidrógeno o el ozono, los cuales actúan mediante un mecanismo basado en la producción de radicales OH y su posterior ataque a los contaminantes [18].

El uso de ozono presenta ventajas notables, como su generación in situ, elevado poder oxidante y baja probabilidad de generar contaminantes secundarios [19].

En este contexto, el objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de la cavitación hidrodinámica intensificada con ozono para la remoción de diclofenaco en solución acuosa. Se consideraron como variables experimentales el pH y la concentración iniciales de DCF, con el propósito de determinar su influencia en la eficiencia del proceso y determinar las condiciones más favorables para ello, utilizando como variable de respuesta el porcentaje de remoción de DCF.

2. Materiales y Métodos

El diclofenaco (DCF), con una pureza del 99%, fue suministrado por una empresa farmacéutica local. El agua empleada para las diluciones se obtuvo de un purificador ELGA PURELAB, el cual proporciona agua con una conductividad eléctrica inferior a $0,2 \mu\text{S/cm}$.

Los factores experimentales seleccionados fueron el pH inicial (4 y 7) y la concentración inicial de DCF (5 mg/L y 10 mg/L). Con base en estos parámetros, se planteó un diseño experimental de tipo central compuesto por cinco réplicas del punto central, para un total de 13 pruebas. El análisis de varianza (ANOVA) permitió establecer el efecto de dichos parámetros y sus interacciones sobre la variable de respuesta, definida como el porcentaje de disminución de concentración de DCF y del carbono orgánico total (COT) en la solución tras el tratamiento [20].

Una vez finalizados los ensayos, se identificaron las condiciones más favorables. Posteriormente, se realizaron pruebas adicionales bajo las condiciones óptimas halladas, aplicando cada técnica de forma individual, para así verificar si el proceso combinado o intensificado ofrecía

mayor eficiencia que las metodologías empleadas por separado.

Cada ensayo tuvo una duración de 30 minutos. Durante este periodo, la temperatura del agua contaminada con DCF aumentó de manera significativa; por esta razón, durante lapsos más prolongados podría inducir pérdidas por evaporación, afectando la exactitud del análisis. El proceso se llevó a cabo con un generador de ozono con capacidad de producción de 5 g de O_3 /h.

La cavitación hidrodinámica se indujo mediante un tubo Venturi, cuyo diámetro de flujo se reducía de 0,0254 m a 0,00635 m. El sistema contó con una bomba de recirculación con una potencia de 745,7 W y una presión de descarga de 0,441 MPa.

La concentración de DCF se determinó por espectrofotometría UV, para una longitud de onda de 276 nm [21], mientras que el análisis de COT fue llevado a cabo en un TOC-L Shimadzu. El pH inicial de las soluciones fue ajustado con NaOH (0,1 M) y HCl (0,1 M) según fuera necesario, registrándose con un potenciómetro Metrohm 781 pH/Ion Meter.

El ozono se suministró a través de un difusor poroso con un tamaño de burbuja de 0.1 mm, ubicado cerca del punto de succión de la bomba, de manera que el gas pudiera ser arrastrado por el fluido y transportado a través de todo el sistema. El volumen de solución acuosa tratada en cada uno de los ensayos fue de 0,005 m³ y el diámetro de la tubería de succión y la manguera de descarga fue de 0,0254 m.

La Figura 1 presenta una fotografía del reactor de cavitación hidrodinámica empleado en los ensayos.



Figura 1. Fotografía del reactor de cavitación hidrodinámica.

En los procesos de CH el número de cavitación (σ) se emplea para determinar si la formación de cavidades toma lugar en el punto de reducción de área. El cálculo del número de cavitación en el reactor se hizo con la ecuación 1.

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{0,5\rho v_g^2} \quad (1)$$

En la ecuación anterior, σ es el número de cavitación (adimensional), P_2 es la presión aguas abajo del punto de reducción de área (Pa), P_v es la presión de vapor del agua (Pa), ρ es la densidad del agua (kg/m³) y v_g es la velocidad del agua en la garganta del Venturi (m/s), es decir, el punto de disminución de área. Los valores de σ menores que 1 confirman la formación de cavidades en el fluido [22], mientras que los valores de σ cercanos a cero señalan que el fenómeno de cavitación ocurre en lo que se conoce por supercavitación, de manera que la excesiva cantidad de cavidades formada disminuye la efectividad del proceso [23].

Otro parámetro que se debe considerar es el número de ciclos de cavitación, N_c , el cual corresponde a la cantidad de veces que el líquido pasa a través del punto de cavitación y por lo tanto, el número de veces que es cavitado el fluido. Este parámetro se determinó a partir de la ecuación 2.

$$N_c = \frac{Qt}{V} \quad (2)$$

Donde Q es el caudal que fluye en el reactor (m^3/s), t corresponde al tiempo de reacción (s) y V al volumen de agua en el reactor (m^3). La variable de respuesta y el porcentaje de remoción fue calculado con la expresión 3.

$$\% \text{ de remoción} = 100 \frac{C_o - C_f}{C_o} \quad (3)$$

En esta ecuación C_o y C_f representan la concentración inicial y final de DCF respectivamente.

3. Resultados y Análisis

El caudal impulsado por la bomba en cada uno de los ensayos fue de $0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de este valor se calculó el número de cavitación ($\sigma = 0,797$), lo cual confirma la formación de cavidades de vapor de agua en el seno del líquido. Asimismo, se determinó que el fluido fue sometido a un total de 360 ciclos de cavitación durante el proceso.

Los resultados experimentales obtenidos bajo las diferentes condiciones operacionales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los ensayos realizados

| pH inicial de la solución acuosa | Concentración inicial de DCF ($\frac{\text{mg}}{\text{L}}$) | Porcentaje de remoción de DCF |
|----------------------------------|---|-------------------------------|
| 5,50 | 7,50 | 21,60 |
| 5,50 | 3,96 | 28,11 |
| 7,62 | 7,50 | 9,73 |
| 4,00 | 5,00 | 41,00 |
| 5,50 | 7,50 | 21,86 |
| 5,50 | 7,50 | 21,46 |
| 7,00 | 10,00 | 8,50 |
| 7,00 | 5,00 | 13,80 |
| 5,50 | 7,50 | 22,00 |
| 5,50 | 11,04 | 8,87 |
| 3,38 | 7,50 | 35,33 |

De acuerdo con los resultados experimentales, se observó que tanto el pH como la concentración inicial de la solución influyen significativamente en el porcentaje de remoción de DCF. En condiciones de pH ácido (menor de 5), se alcanzaron mayores niveles de degradación de DCF, con eficiencias de remoción superiores al 35%. Por el contrario, las soluciones con pH neutro o básico presentaron una menor eficiencia en la eliminación del contaminante.

En ninguno de los ensayos realizados se evidenció una disminución de la concentración de COT, lo cual indica que la molécula posiblemente se fracciona, pero no se mineraliza completamente. Esta situación explica la ausencia de una reducción significativa del COT en la solución acuosa tras el tratamiento.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos experimentales se presenta en la Tabla 2. El propósito de este análisis fue determinar estadísticamente si las variables experimentales ejercen una influencia significativa en la degradación de DCF y, de esta manera, confirmar las tendencias observadas en la tabla de resultados.

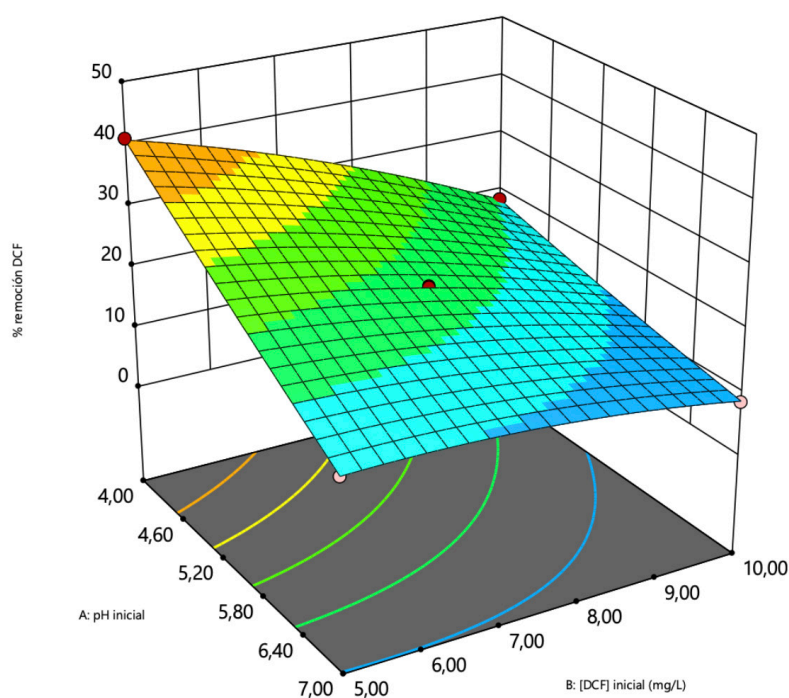
A partir de los resultados obtenidos en el ANOVA, se confirma que las dos variables o factores experimentales tienen efecto sobre la variable de respuesta, así como también sus interacciones.

Por otra parte, el ajuste de los datos a la superficie de respuesta (SDR) presenta un alto grado de correlación ($R^2 = 0,9997$), lo que indica que, desde el punto de vista estadístico, la SDR describe adecuadamente el comportamiento experimental y permite realizar predicciones del proceso dentro del rango de variables estudiadas.

Tabla 2. ANOVA y resultados estadísticos para la remoción de DCF como variable de respuesta

| Fuente | SC Suma de Cuadrados | GL Grados de Libertad | CM Cuadrado Medio | Valor F | Valor p | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|----------|----------|--------------------------|
| Modelo | 1146,76 | 5 | 229,35 | 4526,71 | < 0,0001 | S Significativo |
| A-pH inicial | 673,52 | 1 | 673,52 | 13293,17 | < 0,0001 | |
| B-[DCF] inicial | 378,15 | 1 | 378,15 | 7463,53 | < 0,0001 | |
| AB | 73,96 | 1 | 73,96 | 1459,75 | < 0,0001 | |
| A² | 1,03 | 1 | 1,03 | 20,25 | 0,0028 | |
| B² | 18,61 | 1 | 18,61 | 367,28 | < 0,0001 | |
| Residual | 0,3547 | 7 | 0,0507 | | | |
| Falta de ajuste | 0,1769 | 3 | 0,0590 | 1,33 | 0,3829 | N No significativo |
| Error Puro | 0,1778 | 4 | 0,0444 | | | |
| Corr. Total | 1147,11 | 12 | | | | |
| R² | 0,9997 | | | | | |
| R² ajustado | 0,9995 | | | | | |

La superficie de respuesta obtenida al correlacionar los resultados experimentales se muestra en la Figura 2. En ella se observa que la mayor remoción se alcanza a un pH inicial de 4 y una concentración inicial de DCF de 5 mg/L.

**Figura 2.** Superficie de respuesta para los resultados experimentales obtenidos.

El máximo porcentaje de remoción o disminución de concentración de DCF alcanzado fue del 41%, valor considerado satisfactorio para un tiempo de retención de 30 minutos. En la superficie de respuesta SDR se observa que las condiciones más favorables para el proceso corresponden a un pH bajo y a una baja concentración de contaminante. Desde el punto de vista de la cavitación hidrodinámica CH, las condiciones fuertemente ácidas favorecen la generación de radicales OH por causa de la descomposición del peróxido de hidrógeno generado in situ, además se dificulta la recombinación de estos radicales. Adicionalmente, la capacidad de oxidación de los radicales es mayor en condiciones ácidas [24].

Con relación al diclofenaco DCF, su pK_a es 4, por lo que el compuesto para este valor de pH permanece principalmente en su forma molecular [6]. Este carácter hidrofóbico causa que el DCF se acumule en la superficie de las cavidades o burbujas y pueda reaccionar con mayor facilidad con los radicales formados durante el colapso de las cavidades. Por su parte la hidrofobicidad del DCF a pH bajo puede propiciar una reacción directa con el ozono, incrementando la eficiencia global del proceso de degradación. Los ensayos individuales —solo CH y solo ozono— presentaron porcentajes de remoción inferiores al 5% y al 7%, respectivamente, incluso bajo las condiciones óptimas identificadas en el diseño experimental.

En lo referente al ozono, este compuesto se utiliza ampliamente en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para oxidar una gran variedad de contaminantes orgánicos, atribuida a su alto potencial oxidante, equivalente a 2,08 eV [17]. No obstante, su aplicación presenta limitaciones asociadas a la transferencia de masa hacia las soluciones acuosas, al combinar la CH con ozono se logra disminuir esta limitación debido a la alta turbulencia creada en el fluido por el fenómeno de CH.

El efecto intensificador de aplicar ambas técnicas de manera simultánea puede atribuirse, por una parte, a la descomposición del ozono en oxígeno atómico en presencia de CH, lo cual favorece la formación de radicales OH, y por otra, a la reacción directa del ozono en contacto con la interfase del líquido en la cual debido a su hidrofobicidad se acumula el DCF.

El pH influye notablemente en la efectividad del ozono: en condiciones alcalinas, este se descompone generando radicales OH [25], cuyo potencial oxidante es de 2.8 eV, es superior al del propio ozono, estos radicales son poco selectivos y por tanto, actúan de forma efectiva sobre los contaminantes presentes en solución [26]. Por el contrario, a pH bajo, menor que su pK_a que tiene un valor de 4,8 [27], el ozono actúa de manera directa en la descomposición o transformación de los contaminantes presentes en la solución y tiende a reaccionar con grupos funcionales presentes en la molécula contaminante (aminas, grupos aromáticos activos y otros) [2] dando lugar a la ruptura de enlaces en la molécula, con lo cual las condiciones primigenias del contaminante varían y su concentración disminuye.

En el presente estudio, el pH de la solución que permitió alcanzar la mayor remoción fue 4, un valor menor que su pK_a y para el cual el ozono actúa de manera directa, pero debido al efecto de la CH se puede descomponer para formar radicales OH e incrementar la efectividad del proceso estudiado.

En cuanto a la concentración de DCF en la solución, el sistema siempre presentó las mismas condiciones, por lo que la cantidad de ozono dosificado y la generación de radicales OH por causa de la CH hidrodinámica fueron constantes, es decir, el número de cavitación y ciclos de cavitación;

en consecuencia, cuando la concentración de DCF es baja la relación entre agentes oxidantes y DCF es mayor y, la probabilidad de reacción se incrementa, se logra una remoción máxima del 40% a pH 4 y una concentración de DCF de 5 mg/L.

4. Conclusiones

Los resultados del presente estudio demuestran que la cavitación hidrodinámica CH intensificada con ozono permite un mayor alcance en la remoción de diclofenaco DCF presente en solución acuosa, con un porcentaje de eliminación del 40%, frente a valores inferiores al 5% para la CH aplicada de manera individual y menores al 7% para el ozono utilizado por separado.

El incremento en la remoción podría atribuirse a la turbulencia intensa generada en el punto de cavitación, lo que mejora la transferencia de ozono hacia la solución acuosa y favorece su descomposición para producir oxígeno atómico (O), que posteriormente forma radicales OH capaces de reaccionar con el contaminante. En todos los ensayos, el número de cavitación fue de 0,797, lo que confirma la formación de burbujas o cavidades en el líquido.

El análisis de varianza ANOVA de los resultados experimentales evidenció que tanto el pH inicial de la solución como la concentración inicial de DCF, así como sus interacciones hasta el segundo orden, influyen significativamente en el porcentaje de remoción de DCF. La superficie de respuesta SDR elaborada a partir de los datos experimentales presentó una correlación R^2 0,9997, es decir, los resultados experimentales se ajustan adecuadamente a la SDR obtenida y, a partir de esto, se estableció que las condiciones iniciales de la solución acuosa que permitieron alcanzar la mayor remoción (40%) fueron pH 4 y concentración de DCF de 5 mg/L. Este porcentaje de disminución de concentración puede ser considerado favorable

para un periodo de reacción de 0.5 h. Es probable que debido a la hidrofobicidad del DCF a pH menor de 4,15, este se acumule en la interfaz de las cavidades o burbujas y sea atacado por los radicales OH formados cuando colapsan las cavidades y por la descomposición de ozono.

No se observó una disminución de carbono orgánico total COT en ninguno de los experimentos, es decir, no ocurrió la mineralización del DCF. Sin embargo, la disminución de su concentración indica que posiblemente el DCF puede haber perdido grupos funcionales o que se haya presentado la ruptura de grupos aromáticos que hacen la concentración del contaminante sea menor.

Referencias

- [1] S. Khulu, et al., "Multivariate optimization of a two-way technique for extraction of pharmaceuticals in surface water using a combination of membrane assisted solvent extraction and a molecularly imprinted polymer," *Chemosphere*, vol. 286, p. 131973, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.chemosphere.2021.131973](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131973).
- [2] I. Alessandretti, C. V. T. Rigueto, M. T. Nazari, M. Rosseto, and A. Dettmer, "Removal of diclofenac from wastewater: A comprehensive review of detection, characteristics and tertiary treatment techniques," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier Ltd., Dec. 1, 2021, doi: [10.1016/j.jece.2021.106743](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106743).
- [3] H. Mkaddem, E. Rosales, M. Pazos, H. Ben Amor, M. A. Sanromán, and J. Meijide, "Anti-inflammatory drug diclofenac removal by a synthesized MgAl layered double hydroxide," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 359, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.molliq.2022.119207](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119207).

- [4] P. Finkbeiner, M. Franke, F. Anschuetz, A. Ignaszak, M. Stelter, and P. Braeutigam, "Sono-electrochemical degradation of the anti-inflammatory drug diclofenac in water," *Chemical Engineering Journal*, vol. 273, pp. 214–222, Aug. 2015, doi: [10.1016/j.cej.2015.03.070](https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.070).
- [5] L. de Melo Pirete et al., "Biodegradation of diclofenac and ibuprofen in Fluidized Bed Reactor applied to sanitary sewage treatment in acidogenic and denitrifying conditions," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, Oct. 2022, doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102964](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102964).
- [6] D. Bedadeep, T. Shahnaz, V. Manu Sankar, L. Sahoo, and S. Narayanasamy, "Organic polymer doped graphene-based composite for the effective elimination of diclofenac: A detailed study with phytotoxic assessments," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 1, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.jece.2022.109223](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109223).
- [7] M. S. Elshikh, D. S. Hussein, F. S. Al-khattaf, R. A. Rasheed El-Naggar, and K. S. Almaary, "Diclofenac removal from the wastewater using activated sludge and analysis of multidrug resistant bacteria from the sludge," *Environmental Research*, vol. 208, May 2022, doi: [10.1016/j.envres.2022.112723](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112723).
- [8] M. Esterhuizen and S. Pflugmacher, "Phytoremediation of diclofenac using the Green Liver System: Macrophyte screening to system optimization," *New Biotechnology*, vol. 76, pp. 82–89, Sep. 2023, doi: [10.1016/j.nbt.2023.05.004](https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.05.004).
- [9] M. Jain, P. Sai Kiran, P. S. Ghosal, and A. K. Gupta, "Development of microbial fuel cell integrated constructed wetland (CMFC) for removal of paracetamol and diclofenac in hospital wastewater," *Journal of Environmental Environ Manage*, vol. 344, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.jenvman.2023.118686](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118686).
- [10] L. de Melo Pirete et al., "Biodegradation of diclofenac and ibuprofen in Fluidized Bed Reactor applied to sanitary sewage treatment in acidogenic and denitrifying conditions," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, Oct. 2022, doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102964](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102964).
- [11] Z. Ji, T. Liu, and H. Tian, "Electrochemical degradation of diclofenac for pharmaceutical wastewater treatment," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 12, no. 8, pp. 7807–7816, Aug. 2017, doi: [10.20964/2017.08.72](https://doi.org/10.20964/2017.08.72).
- [12] Z. Ji, T. Liu, and H. Tian, "Electrochemical degradation of diclofenac for pharmaceutical wastewater treatment," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 12, no. 8, pp. 7807–7816, Aug. 2017, doi: [10.20964/2017.08.72](https://doi.org/10.20964/2017.08.72).
- [13] N. Aghababaei, M. Abdouss, H. Hosseini-Monfared, and F. Ghanbari, "Photocatalytic degradation of diclofenac using a novel double Z-scheme catalyst (O-g-C₃N₄/ZnO/TiO₂@halloysite nanotubes): Degradation mechanism, identification of by-products and environmental implementation," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 53, Jul. 2023, doi: [10.1016/j.jwpe.2023.103702](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103702).
- [14] J. C. C. Ebal et al., "Fenton-like degradation of diclofenac in water using iron-impregnated mussel shell biochar (Fe@MSBC)," *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2023.04.158](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.158).
- [15] P. S. Cavalheri et al., "Ketoprofen and diclofenac removal and toxicity abatement in a real scale sewage treatment Plant by photo-Fenton Process with design of experiments," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 5, p. 110699, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.jece.2023.110699](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110699).

- [16] D. Meroni et al., "Sonophotocatalytic degradation of sodium diclofenac using low power ultrasound and micro sized TiO₂," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 67, Oct. 2020, doi: [10.1016/j.ultsonch.2020.105123](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105123).
- [17] S. Raut-Jadhav, D. Saini, S. Sonawane, and A. Pandit, "Effect of process intensifying parameters on the hydrodynamic cavitation based degradation of commercial pesticide (methomyl) in the aqueous solution," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 28, pp. 283–293, 2015, doi: [10.1016/j.ultsonch.2015.08.004](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.08.004).
- [18] S. Raut-Jadhav, M. P. Badve, D. V. Pinjari, D. R. Saini, S. H. Sonawane, and A. B. Pandit, "Treatment of the pesticide industry effluent using hydrodynamic cavitation and its combination with process intensifying additives (H₂O₂ and ozone)," *Chemical Engineering Journal*, vol. 295, pp. 326–335, 2016, doi: [10.1016/j.cej.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.019).
- [19] Y. C. Yang et al., "An intensified ozonation system in a tank reactor with foam block stirrer: Synthetic textile wastewater treatment and mass transfer modeling," *Separation and Purification Technology*, vol. 257, no. October 2020, p. 117909, 2021, doi: [10.1016/j.seppur.2020.117909](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117909).
- [20] M. Lungelo Dlamini, M. Lesaoana, I. A. Kotzé, and H. L. Richards, "Response surface methodology mediated optimization of diclofenac and norfloxacin biodegradation using laccase immobilized on metal–organic frameworks," *Separation and Purification Technology*, vol. 326, p. 124709, Dec. 2023, doi: [10.1016/j.seppur.2023.124709](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124709).
- [21] Q. Liu, W. Ouyang, X. Yang, Y. He, Z. Wu, and K. (Ken) Ostrikov, "Plasma-microbubble treatment and sustainable agriculture application of diclofenac-contaminated wastewater," *Chemosphere*, vol. 334, Sep. 2023, doi: [10.1016/j.chemosphere.2023.138998](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138998).
- [22] A. P. Bhat, C. R. Holkar, A. J. Jadhav, and D. V. Pinjari, "Acoustic and hydrodynamic cavitation assisted hydrolysis and valorisation of waste human hair for the enrichment of amino acids," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 71, p. 105368, 2021, doi: [10.1016/j.ultsonch.2020.105368](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105368).
- [23] A. P. Bhat and P. R. Gogate, "Cavitation-based pre-Treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 104743, 2021, doi: [10.1016/j.jece.2020.104743](https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104743).
- [24] A. V. Mohod, A. C. S. C. Teixeira, M. V. Bagal, P. R. Gogate, and R. Giudici, "Degradation of organic pollutants from wastewater using hydrodynamic cavitation: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier Ltd., Jun. 1, 2023, doi: [10.1016/j.jece.2023.109773](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109773).
- [25] L. Jothinathan, Q. Q. Cai, S. L. Ong, and J. Y. Hu, "Organics removal in high strength petrochemical wastewater with combined microbubble-catalytic ozonation process," *Chemosphere*, vol. 263, 2021, doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.127980](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127980).
- [26] F. C. Moreira, R. A. R. Boaventura, E. Brillas, and V. J. P. Vilar, "Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 202, pp. 217–261, 2017, doi: [10.1016/j.apcatb.2016.08.037](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.037).
- [27] V. Uma and R. Gandhimathi, "Effectiveness of ozone pretreatment on bioconversion of oily bilge water into biopolymer," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 36, no. May, p. 101275, 2020, doi: [10.1016/j.jwpe.2020.101275](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101275).