

# Desempeño de un reactor multi-lámpara a escala piloto en el tratamiento terciario de un agua residual proveniente de la industria alimentaria

Jennyfer Díaz-Angulo<sup>1,3</sup>, José A. Lara-Ramos<sup>1,2</sup>, Karen Fabara-Hernández<sup>3</sup>, Fiderman Machuca-Martínez<sup>2</sup> & Augusto Arce-Sarria<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Investigación y desarrollo tecnológico en tratamiento de aguas, Modelado de procesos y gestión de residuos, GITAM, Cali, Colombia

<sup>2</sup>Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez-A.A. 23360, Cali, Colombia.

<sup>3</sup>Innovación y Desarrollo de Productos y Procesos – IDEPP, Cali, Colombia.



**Para citaciones:** J. Díaz-Angulo, J. Lara-Ramos, K. Fabara-Hernández, F. Machuca Martínez, A. Arce-Sarria, "Desempeño de un reactor multi-lámpara a escala piloto en el tratamiento terciario de un agua residual proveniente de la industria alimentaria", *Ing-NOVA*, vol. 2, no. 1, pp. 23-33, Ene. 2023. <https://doi.org/10.32997/irin-2023-4260>

**Recibido:** 31 de octubre de 2022

**Revisado:** 30 de diciembre de 2022

**Aprobado:** 06 de enero de 2023

**Autor de correspondencia:**

Jennyfer Díaz-Angulo

[jennyfer.da@faoralbs.com](mailto:jennyfer.da@faoralbs.com)

**Editor:** Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

**Copyright:** © 2023. J. Díaz-Angulo, J. Lara-Ramos, K. Fabara-Hernández, F. Machuca Martínez, A. Arce-Sarria. Este es una editorial de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



## RESUMEN

Los procesos avanzados de oxidación son potencialmente promisorios como tratamientos terciarios de aguas residuales industriales. Sin embargo, aun presentan desafíos en cuanto a la eficiencia y al costo de su implementación a escala industrial, los cuales están enfocados en limitaciones de transferencia de masa y/o fotónica ya que en la mayoría de estos como la ozonización, fotólisis o fotocatalisis la etapa limitante resulta ser la difusión y/o absorción de fotones debido a la interacción entre varias fases. Por tanto, la investigación en diseño de reactores que minimicen estas limitaciones y mejoren la eficiencia de los procesos se hace imperativo. En el presente proyecto se investiga un reactor Multi-Lámpara de alto flujo fotónico empleado en varios procesos avanzados de oxidación (UVC, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA) y se evalúa la sinergia entre ellos. Se emplea un agua residual real proveniente del lavado de pescados y pisos del cuarto frío de una empresa dedicada a la comercialización de pescado en el departamento del Valle del Cauca y se evalúan variables como la DQO, grasas y aceites, color y parámetros fisicoquímicos. La remoción de demanda química de oxígeno para cada proceso involucrado encontrado porcentajes de < 2% (UVC), ~19% (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), ~38% (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y ~55% (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA) por lo cual se observa que hay sinergia en la intensificación de procesos al producirse más especies radicales oxidativas que degradan la materia orgánica. Adicionalmente los tratamientos UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA tienen un efecto desinfectante al eliminar bacterias como coliformes totales y *Escherichia Coli*.

**Palabras clave:** Intensificación; PAOX; Tratamiento de aguas; Escala piloto; Agua real.

## Performance of a Pilot Scale Multi-Lamp Reactor in the Tertiary Treatment of Residual Water from the Food Industry

### ABSTRACT

Advanced oxidation processes have a potential promising as tertiary treatments for industrial wastewater. However, they still present challenges associated to efficiency

and implementation cost on an industrial scale which are focused on mass transfer and/or photonics limitations. Processes such as ozonation, photolysis or photocatalysis have a limiting stage defined by diffusion and/or absorption of photons due to the interaction between several phases. Therefore, research on reactor design that minimizes these limitations and improves the efficiency of the processes is imperative. In this work, a high photonic flux Multi-Lamp reactor used in several advanced oxidation processes (UVC UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> and UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA) is investigated and the synergy among them is evaluated. A real residual water from the fish washing and floors coming from of the cold room of a company dedicated to the commercialization of fish in the department of Valle del Cauca is used. It is evident that the intensification between UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA improves the efficiency in the removal of COD, color and fats and oils. Additionally, the UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> and UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA treatments have a disinfecting effect by eliminating bacteria such as total coliforms and Escherichia Coli.

**Keywords:** Intensification; AOP; Water treatment; Pilot scale; Real water.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el crecimiento demográfico descontrolado ha traído consigo gran cantidad de problemas, los cuales se pueden enfrentar desde la óptica del desarrollo sostenible. En la parte ambiental, específicamente en el uso de recursos hídricos, se observa alta demanda de agua de calidad para uso y consumo de la población, y de igual manera para abastecer al sector agropecuario e industrial. En ese sentido, se hace de vital importancia la generación de agua residual urbana e industrial, lo que conlleva a la implementación de procesos de tratamiento estratégicos, que mitiguen, en la medida de lo posible, el vertido de contaminantes en los cuerpos de agua superficiales [1].

Alrededor del 0,3% de los recursos hídricos en el mundo son utilizables. La escasez de agua ya existe en muchas regiones, con más de mil millones de personas sin agua potable adecuada [2], [3]. En la actualidad, el uso del agua ha incrementado el doble debido al crecimiento poblacional. Que ha aumentado no solo su demanda, sino también la aparición de agentes nocivos en fuentes acuáticas a causa de la contaminación. De hecho, dichas actividades generan un significativo número de contaminantes que son liberados al medioambiente a través de las aguas de desecho, las cuales contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Muchas de estas sustancias contaminantes son altamente tóxicas y difíciles de ser degradadas por la naturaleza [4], [5].

Colombia por ser un país rico en recursos hídricos, la pesca se concibe como una alternativa económica importante [6]. Sin embargo, ha enfrentado varios problemas en los últimos años, uno de los más importantes ha sido a raíz de la transformación y el procesamiento del pescado, dado a que produce una considerable cantidad de aguas residuales que están contaminadas con sustancias orgánicas como proteínas, compuestos aromáticos, y ácidos grasos, emulsión de aceite en agua que va acompañada de proteínas y otros compuestos orgánicos, denominada agua de cola [7]. Entre las consecuencias generadas en la zona de influencia de empresas que se dedican a la actividad pesquera se encuentran: i) contaminación de ríos y áreas costeras, ii) problemas de insalubridad en las zonas de descarga, iii) contaminación atmosférica por malos olores, iv) pérdida del potencial turístico de la región v) incumplimiento de la normativa legal vigente en materia de vertido y disposición de efluentes, y vi) colapso del sistema de drenaje urbano y pérdida de eficiencia de la planta de tratamiento local [8].

Situaciones que justifican el desarrollo y evaluación de tecnologías de tratamiento encaminadas a reducir los impactos ambientales ocasionados por el inadecuado manejo y disposición de efluentes industriales, considerando su composición y efectos sobre los ecosistemas naturales [9].

Se han reportado trabajos de investigación en la literatura científica sobre métodos y/o tecnologías relacionadas con procesos avanzados de oxidación [10],[11],[12]. Los procesos de oxidación avanzada (PAOs) han recibido una atención creciente en la investigación y el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en las últimas décadas. Estos procesos (p. ej., cavitación, oxidación fotocatalítica, química de Fenton, ozonización, ozono, radiación UV, peróxido de hidrógeno, electrocoagulación y oxidación electroquímica) se han aplicado con éxito para la eliminación o degradación de contaminantes recalcitrantes, o se han utilizado como pretratamiento para convertir los contaminantes en compuestos de cadena más corta que luego pueden tratarse mediante métodos convencionales o biológicos [13], [14]. Los PAOs se caracterizan por la alta reactividad del radical hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), que actúa como agente oxidante de la materia orgánica, lo cual genera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y compuestos menos peligrosos debido a que son degradados de manera eficaz sustancias orgánicas complejas, macrocontaminantes y microcontaminantes que no logran eliminarse de manera eficiente por procesos convencionales, debido a la acción de los radicales de hidroxilo que son especies químicas altamente reactivas [15], [16].

En el presente artículo se evaluó el desempeño de un reactor Multi-Lámpara a escala piloto para el tratamiento de un agua residual industrial de lavado del pescado proveniente de una empresa comercializadora de filetes mediante diferentes procesos avanzados de oxidación como fotólisis con peróxido de hidrógeno intensificado con ozonización y adsorción con carbón activado.

## **1. Materiales y métodos**

### **1.1. Materiales**

Se usó peróxido de hidrógeno (pureza 50% v/v) como agente oxidante. Se preparó una solución 0.06 M de metavanadato de amonio (Merck, p.a) como reactivo colorimétrico para determinar el consumo de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . En la solución se añadieron 20 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (AppliChem Panreac, pureza 98%) para mantener la estabilidad de la disolución que se aforo hasta 1L con agua desionizada tipo II. Para las mediciones de demanda química de oxígeno (DQO) se utilizaron reactivos HI 94754B-25, estos reactivos de alta calidad son para rango medio (0-1500 mg/L de  $\text{O}_2$ ).

### **1.2. Procedimiento experimental**

El procedimiento base utilizado para una prueba consiste inicialmente en cargar el sistema (Ver Figura 1) con 30 L del agua residual en el tanque de reacción. Posteriormente se deja recirculando por 10 min y se toma una muestra inicial para caracterizar el agua, subsecuentemente se añade una cantidad de peróxido de hidrógeno al sistema (300 ppm). Seguido a esto se encienden las lámparas (UVC) y el ozonizador. Para la prueba con adsorción de carbón activado se desvía el flujo hacia los filtros. El proceso tiene una duración de 2 horas durante el cual se toman muestras cada 20 minutos midiendo distintos parámetros (pH, Oxígeno disuelto, conductividad y TDS). Finalizadas las 2 horas se mide de inmediato

el peróxido residual a las muestras tomadas y por último se realizan mediciones de parámetros restantes (Turbiedad, color y DQO). Para la prueba de fotólisis solo se encienden las lámparas UVC, y para la prueba UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no se enciende el ozonizador.

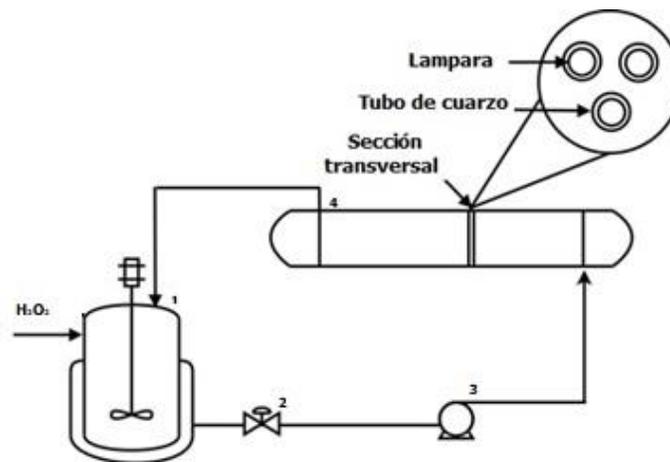
### 1.3. Técnicas analíticas

Se utilizaron diferentes técnicas analíticas para determinar la eficiencia de los procesos sobre el tratamiento del agua residual. La concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se determinó mediante el método colorimétrico de metavanadato usando espectrometría UV-Vis con un UV-2600 Shimadzu. El método se basa en la reacción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con metavanadato de amonio en medio ácido, lo que da como resultado la formación de un catión de peroxo-vanadio de color rojo anaranjado, con absorbancia máxima a 450 nm.

La DQO se midió utilizando viales reactivos HI 94754B-25 que cumplen con el método 410.4 de EPA y los métodos estándar 5220D, un fotómetro HI 83214 y un reactor HI 839800 provenientes todos de HANNA Instruments. Se utilizó un medidor multiparamétrico HI 98194 de HANNA Instruments para las mediciones de potencial de óxido-reducción (ORP), pH, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos y temperatura. Para la medición de turbiedad se usó un turbidímetro HACH 2100N. Se midió el color verdadero de las muestras en unidades de Pt/Co a 340 nm utilizando un espectrofotómetro de UV-Vis 2600 Shimadzu.

### 1.4. Sistema de reacción

El reactor Multi-Lámpara tiene un diámetro interno de 12.5 cm y una longitud de 105 cm. Cuenta con tres lámparas UVC de mercurio de alta presión con longitud de onda de 253.7 nm y con 55W de potencia de entrada y con recubrimientos de cuarzo de 95.5 cm de longitud y 3.4 cm de diámetro interno. Las lámparas cuentan con una longitud de 92.5 cm y un diámetro de 2.5 cm. El volumen del reactor y de agua real utilizada es de 8 L y 30 L respectivamente. El flujo volumétrico es de 10 L/min. El sistema consta de un tanque de recirculación seguido de una bomba que conduce el fluido al reactor Multi-Lámpara y posteriormente retorna nuevamente al tanque como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Configuración experimental del sistema de reacción (1. Tanque de almacenamiento/recirculación, 2. Válvula, 3. Bomba centrífuga, 4. Reactor Multi-Lámpara)

## 2. Resultados y discusión

### 2.1. Caracterización del efluente

Agua residual: Efluente industrial proveniente de la industria alimentaria en el Valle del Cauca, específicamente agua de lavado de pescado que contiene residuos de sangre y material orgánico, así como tensoactivos y jabones producto de la limpieza de pisos. En la Tabla 1 se presentan los valores promedio obtenidos de diferentes mediciones al agua real.

**Tabla 1.** Caracterización del agua residual

Parámetro (unidades)	Valor
DQO (mg/L)	750 ± 28
ORP	142.20 ± 89.05
Oxígeno Disuelto (%)	71.4 ± 3.59
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6 ± 0.30
Conductividad (µS/cm)	1600 ± 12.64
TDS (mg/L)	651 ± 6.06
pH	7.27 ± 0.45
Turbiedad	309 ± 3.53

### 2.2. Evaluación de la remoción de demanda química de oxígeno (DQO)

Diferentes procesos se llevaron a cabo en el sistema de reacción con el fin de determinar posibles sinergias para mejorar el proceso oxidativo. En la Figura 2 se observan los porcentajes de DQO removidos que fueron: < 2% mediante fotólisis, ~19% para UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ~38% para UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y ~55% para UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA. Acorde a los resultados expuestos se hace evidente dos aspectos, el primero es el alto carácter recalcitrante del agua residual industrial usada para las pruebas experimentales, el segundo la sinergia que existe entre los procesos al encontrar mejores resultados de remoción cuando se combinan.

En el proceso de fotólisis (UVC), la luz rompe los enlaces débiles de las moléculas orgánicas desencadenando así la degradación de esta, sin embargo, en este caso no generó mayor impacto (<2%), esto debido a la naturaleza recalcitrante del agua residual. Por otra parte, cuando se añade un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno y se emplea el proceso (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), se producen radicales hidroxilos (HO<sup>•</sup>) debido a la descomposición homolítica del peróxido de hidrogeno lo cual aumenta la degradación de la materia orgánica [17].

Por otra parte, en el proceso UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> tienen lugar la descomposición homolítica de peróxido de hidrogeno, la fotólisis y además la molécula de ozono puede reaccionar directamente con la materia orgánica o con la luz y el peróxido de hidrógeno para producir radicales como el O<sub>2</sub><sup>-•</sup>, O<sub>3</sub><sup>-•</sup>, HO<sub>2</sub><sup>•</sup>, HO<sub>3</sub><sup>•</sup>, entre otros que aumentan la sinergia del proceso y la capacidad oxidativa, por último, en el proceso UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA se añade una etapa de adsorción con carbón activado lo que da lugar a la posibilidad de que ocurran procesos catalíticos aumentando la eficiencia de utilización de ozono y de peróxido de hidrógeno, esto explica los mejores porcentajes de remoción al añadir más agentes oxidantes [18].

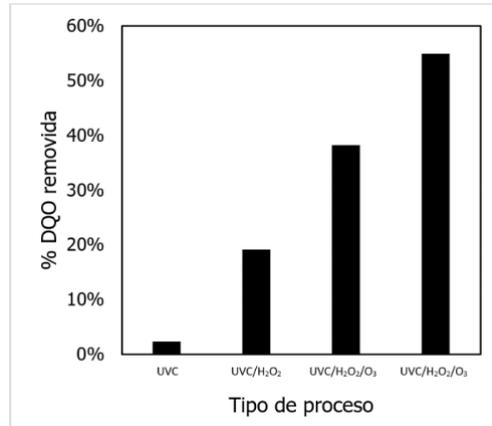


Figura 2. Evaluación de la demanda química de oxígeno removida con respecto al tipo de proceso empleado.

### 3.3 Evaluación de parámetros fisicoquímicos

#### 3.3.1 Color

El color es uno de los indicadores más evidentes de la contaminación en el agua, por lo cual se realizó su seguimiento en la escala Platino/Cobalto. En la Figura 3 se observa que no tuvo mayor variación para la prueba de fotólisis con UVC, mientras que para los procesos de UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA se obtuvieron porcentajes de 20, 45 y 60%, respectivamente. Esto demuestra una vez más la alta sinergia al intensificar procesos dentro del reactor Multi-lámpara, puesto que la combinación de agentes oxidantes aumenta la eficiencia.

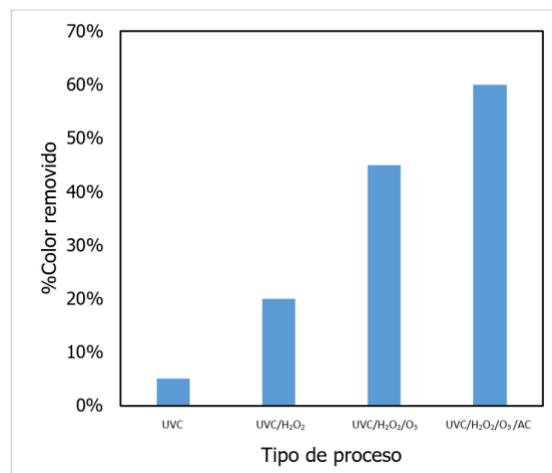


Figura 3. Evaluación del color removido con respecto al tipo de proceso empleado.

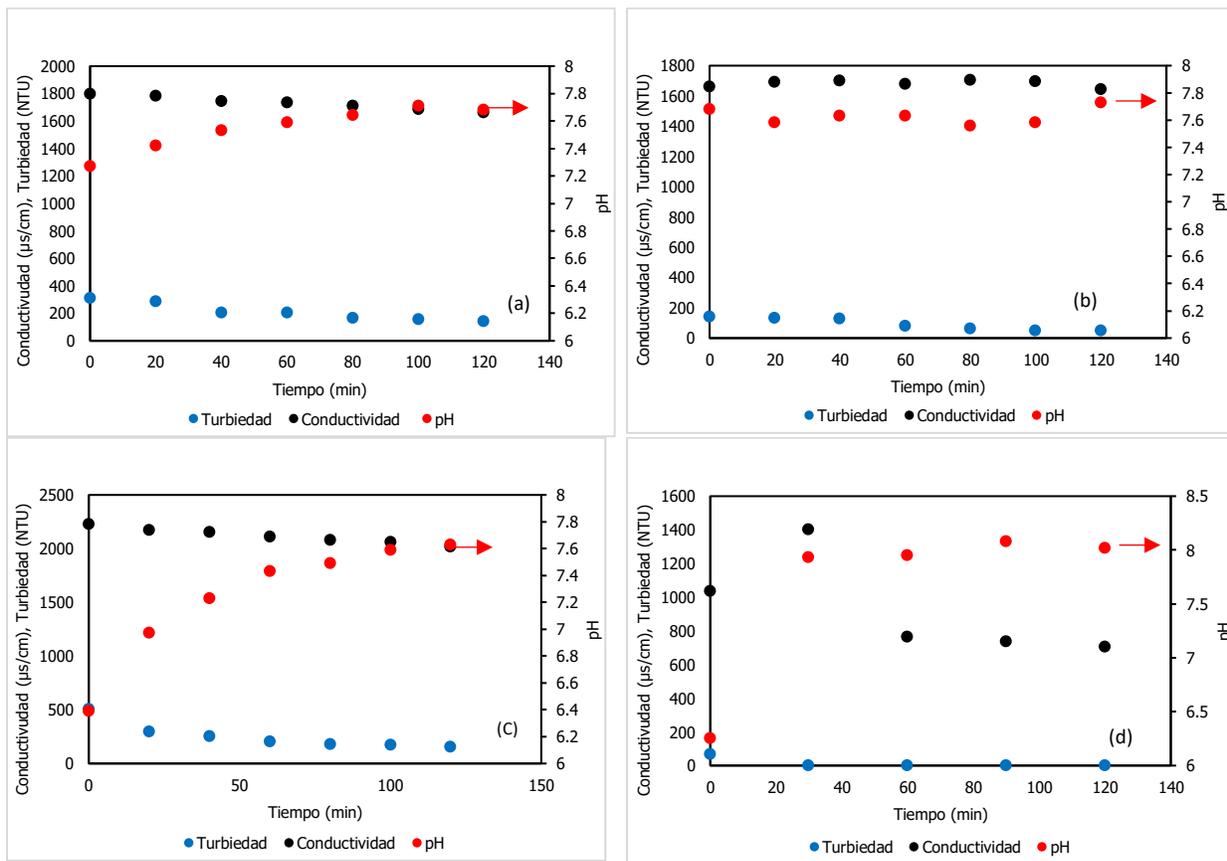
#### 3.3.2. Turbiedad, pH y conductividad

En las aguas residuales industriales se deben tener en cuenta para su vertimiento parámetros como la turbiedad, pH y conductividad, por tanto durante la presente investigación se realizó un seguimiento de estos parámetros durante el tratamiento para los procesos de estudio. La turbiedad es una medida de la transparencia del agua y se ve afectada por el color, y por la cantidad de sólidos suspendidos. En todos los casos evaluados este parámetro presentó una disminución que fue del 45% (UVC), 65%

(UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 72% (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y 97% (UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA). Es evidente que el proceso que involucra el filtro de carbón activado presenta casi una remoción total de turbidez ya que la mayoría de las partículas en suspensión quedan atrapadas, mientras que en los otros casos la remoción de debe mayoritariamente a la reducción de color y materia orgánica [19].

Debido a la naturaleza del agua, se tiene conocimiento de la presencia de sales inorgánicas y agentes tensoactivos que conllevan a valores alto de conductividad. Este escenario no es ideal para la aplicación de procesos avanzados de oxidación, puesto que tienden afectar la eficiencia debido a la formación de lodo o la competencia por la absorción de luz. La variación de la conductividad para los procesos de UVC, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> muestra una tendencia lineal, la cual se puede observar en la Figura 4a, 4b y 4c con una leve disminución que no supera el 10%. Sin embargo, para el proceso UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA la tendencia es ligeramente errática y se observa una disminución del 32%, lo cual es atribuido al filtro de carbón activado en el cual se adsorbieron iones presentes en el efluente [20].

Por otro lado, el valor de pH se mantuvo cercano al neutro durante las dos horas de reacción para la mayoría de pro procesos empleados y tuvo un aumento de hasta dos unidades en el caso de UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA, lo que también se atribuye a los filtros de carbón y a la relación entre pH y conductividad.



**Figura 4.** Variación de la Turbiedad, pH y conductividad durante los procesos (a) UVC, (b) UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, (c) UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y (d) UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA.

### 3.3.3. Grasas, aceites y análisis microbiológico

El agua residual usada para las pruebas experimentales proviene del lavado de pescado en el cual se desprenden grasas y aceites y material microbiano. Según la norma 0631 del 2015 este es un parámetro relevante de seguimiento y cumplimiento por lo cual se realizó la medición para determinar la eficiencia de remoción según los procesos aplicados, los resultados se pueden ver en la Figura 5. La más alta eficiencia se logra nuevamente con el proceso UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA, lo cual es atribuido a la alta sinergia y a la utilización de carbón activado.

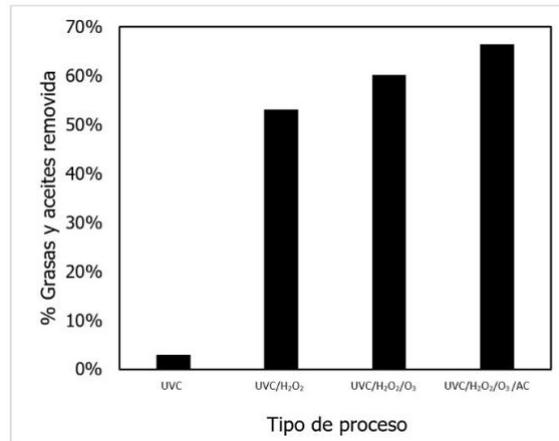


Figura 5. Evaluación de la remoción de grasas y aceites.

Se realizan pruebas de coliformes totales para determinar la carga bacteriana del agua residual, con una dilución de 10<sup>-1</sup> y se observan incontables unidades formadoras de colonias (Figura 6). Adicionalmente, se observan unidades de *Escherichia Coli*. Se evalúa la carga microbiana después de los tratamientos aplicados UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/CA y se observa que no hay crecimiento bacteriano por lo cual todos los tratamientos fueron desinfectantes [21].

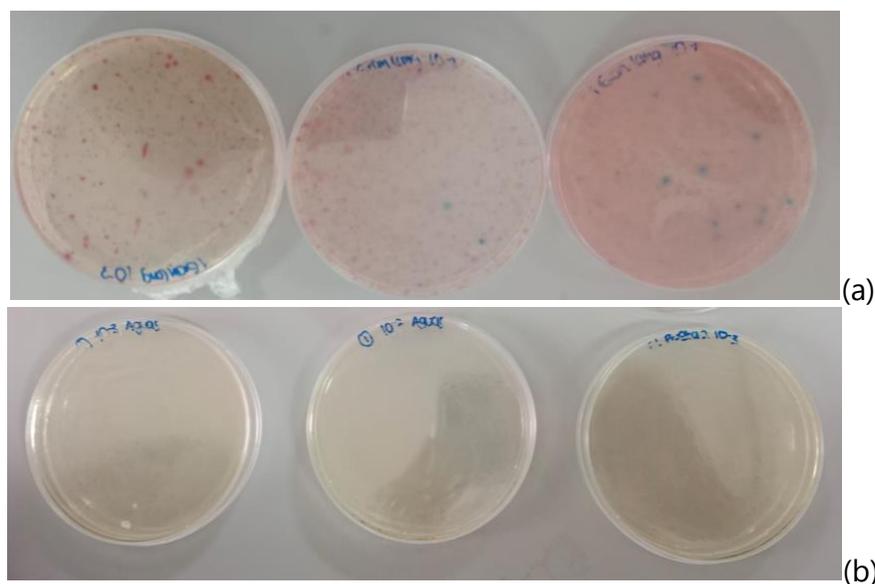


Figura 6. Análisis microbiológico (a) antes de los tratamientos y (b) después de los tratamientos

## 4. Conclusiones

Se evalúa el desempeño de un reactor Multi-Lámpara a escala piloto para el tratamiento de un agua residual industrial proveniente de la industria alimentaria del pescado mediante diferentes procesos avanzados de oxidación que incluyen fotólisis, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y su intensificación con ozonización y adsorción con carbón activado. El agua residual presenta una DQO alta ya que su valor duplica el permitido según la norma, además presenta alta conductividad debido a los iones presentes (tensoactivos en su mayoría), alto contenido de TDS y por tanto alta turbiedad. Se evidencia que los procesos presentan una sinergia positiva ya que al combinarse la eficiencia en remoción de color y demanda química de oxígeno es mayor. Se realiza un análisis de la remoción de grasas, aceites y nivel bacteriano encontrándose una efectividad en el mejor de los casos de hasta 66% lo cual es significativo ya que este parámetro es determinante según la resolución 0631 del 2015 para el vertimiento de aguas residuales. Adicionalmente se encuentra que los tratamientos evaluados tienen un efecto desinfectante al eliminar las coliformes totales y *Escherichia Coli*.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle por el uso de los laboratorios y equipos, a la empresa A&S Consultoría y Suministros y a la Corporación FaoraLabs por la financiación, administración de los recursos y apoyo técnico. Díaz-Angulo agradece al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación de estancia posdoctoral mediante la convocatoria 891 de 2020.

## Referencias

- [1] Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESC.
- [2] Z. Kılıç, "The importance of water and conscious use of water", *Int. J. Hydrol.*, 229 vol. 4, n.º 5, pp. 239–241, 2020.
- [3] J. Liu et al., "Water scarcity assessments in the past, present, and future," *Earth's Future*, vol. 5, n.º 6, 231 pp. 545–559, 2017.
- [4] A. S. C. Salazar, J. G. Rivera Vergara y D. Becerra Moreno, "Procesos avanzados 232 de oxidación usando peróxido de hidrógeno activado con diferentes catalizadores para tratamiento de lixiviado de relleno sanitarios," *Ing-Nova*, vol. 1, n.º 2, p. 205-214, 2022.
- [5] E. Pavas, "Fotocatálisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos," *Rev. Univ.EAFIT*, vol. 127, pp. 59–64, 2002.
- [6] J. E. González-Díaz, J. A. Sánchez-González, E. Ochoa-De-Arco y I. Sánchez-Valbuena, "Modelo de explotación pesquera sostenible como apuesta productiva: caso Moñitos-Córdoba-Colombia," *Saber, Ciencia y Libertad*, vol. 14, n.º 1, pp. 179–189, 2019.

- [7] I. M. Dobbs, "Litter and Waste Management: Disposal Taxes versus User Charges", *Can. J. Econ.*, vol. 24, n.º 1, p. 221, febrero de 1991.
- [8] J. C. Marín Leal, C. A. Chinga Panta, A. I. Velásquez Ferrín, P. A. González Cabo y L. M. Zambrano Rodríguez, "Tratamiento de aguas residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos," *Cienc. Ing. Neogranad.*, vol. 25, n.º 1, p. 27, 2015.
- [9] F. Dolan, J. Lamontagne, R. Link, M. Hejazi, P. Reed y J. Edmonds, "Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world", *Nature Communications*, vol. 12, n.º 1, 2021.
- [10] J. L. WANG y L. J. XU, "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, n.º 3, pp. 251–325, 2012.
- [11] P. Gautam, S. Kumar y S. Lokhandwala, "Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117639, 2019.
- [12] G. Camera-Roda, V. Loddo, L. Palmisano y F. Parrino, "Photocatalytic ozonation for a sustainable aquaculture: A long-term test in a seawater aquarium", *Appl. Catal. B.*, vol. 253, pp. 69–76, 2019.
- [13] A. Montalvan, L. Desdín García, E. Peláez y O. Brígido, "Estado actual en el desarrollo de reactores 256 fotocatalíticos de membranas, para el tratamiento de contaminantes orgánicos persistentes en el agua y las aguas residuales," *Tecnol. Quim.*, vol. 2, n.º 39, p. 421-443, 2019.
- [14] Y. L. Ramirez Arias, "Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor tubular fotocatalítico (uv-a) para la degradación de desechos químicos orgánicos", *Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira*, Facultad de Tecnologías. Química Industrial, 2013.
- [15] A. Yañez, M. Quiñónez, A. Ramírez, y S. Gaona, "Diseño, construcción y 261 puesta a prueba de un reactor fotocatalítico de radiación solar simulada," *Ing-Nova*, vol. 1, n.º 2, pp. 180–194, jul. 2022.
- [16] K. P. Sundar y S. Kanmani, "Progression of Photocatalytic reactors and it's comparison: A Review," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 154, pp. 135–150, 2020.
- [17] G. V. Buxton, C.L. Greenstock, W.P. Helman, A.B. Ross, "Critical Review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}/\cdot\text{O}^-$  in Aqueous Solution)," *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 17 (1988) 513–886. <https://doi.org/10.1063/1.555805>.
- [18] J. A. Lara-Ramos, G. D. Llanos-Díaz, J. Díaz-Angulo, and F. Machuca-Martínez, "Evaluation of Caffeine Degradation by Sequential Coupling of  $\text{TiO}_2/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  Processes," *Top Catal*, vol. 63, no. 11–14, pp. 1361–1373, 2020, doi: 10.1007/s11244-020-01316-w.
- [19] H. Valdés and C. A. Zaror, "Heterogeneous and homogeneous catalytic ozonation of benzothiazole promoted by activated carbon: Kinetic approach," *Chemosphere.*, vol. 65, no. 7, pp. 1131–1136, 2006, doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.04.027.

- [20] M. Umar, F. Roddick, and L. Fan, "Effect of coagulation on treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate by UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>," *J. Hazard. Mater.*, vol. 266, pp. 10–18, 2014, doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.005.
- [21] W. H. Chin, F. A. Roddick, and J. L. Harris, "Greywater treatment by UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>," *Water Res.*, vol. 43, no. 16, pp. 3940–3947, 2009, doi: 10.1016/j.watres.2009.06.050.