

TRATAMIENTO DE AGUAS CON PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA $O_3/UV/H_2O_2$

WATER TREATMENT WITH ADVANCED OXIDATION PROCESSES $O_3/UV/H_2O_2$

Brisa Nikole Herrera Betancur 1 * \$
<https://orcid.org/0009-0008-3370-4860>

Dulce Jazmín Ramos Coria 2 * \$
<https://orcid.org/0009-0005-5007-2728>

Carlos Marcelo Camacho Caero 3 * \$
<https://orcid.org/0000-0002-5083-2572>

DOI: <https://doi.org/10.70722/ytff8639yn99o>
Recibido: Marzo 23, 2025; Aceptado: Abril, 25 2025

RESUMEN

Los procesos de oxidación avanzada son alternativas de mitigación por el incremento de contaminantes más persistentes y resistentes a tratamientos convencionales. El estudio, análisis, experimentación y combinación de estos puede ser muy provechosos para seguir mejorando y escalando los procesos.

El proyecto tiene como objetivo analizar el método de oxidación avanzada $O_3/UV/H_2O_2$ para el tratamiento de aguas, abordando problemas de contaminación hídrica por actividades industriales y agrícolas. Utilizando este proceso, se busca eliminar contaminantes orgánicos, elevando la calidad del agua, reduciendo los riesgos para la salud pública y colocando precedentes para futuras investigaciones.

En paralelo, se emplearán métodos analíticos como herramientas de análisis para medir la concentración de ciertos contaminantes específicos en las muestras de agua. Estos métodos son valiosos para la detección y cuantificación de contaminantes, proporcionando datos precisos sobre la eficacia del tratamiento y ayudando a ajustar las condiciones del proceso de oxidación avanzada.

Los resultados reflejaron, mejora de la calidad del agua, lo que hace posible una reducción de contaminantes y optimización de la seguridad del agua potable y minimizar enfermedades relacionadas con los patógenos del agua. Se llegó a remover 100% de la glucosa que se propuso como contaminante estándar y se llegó a un 80% para los contaminantes del río Rocha. Recomendando el uso de pretratamientos que ayuden a disminuir la turbidez del agua y los rayos UV (254 nm) puedan realizar junto con el ozono y el peróxido de hidrógeno se logre el tratamiento.

Palabras claves: Oxidación Avanzada, $O_3/UV/H_2O_2$, Tratamiento de Aguas, Contaminantes Orgánicos, Calidad del Agua.

ABSTRACT

Advanced oxidation processes are alternatives for treating the increase of more persistent pollutants, since conventional methods are not effective. The study, analysis, experimentation and combination of these can be very useful to continue improving and scaling up the processes.

The project aims to analyze the advanced oxidation method $O_3/UV/H_2O_2$ for water treatment, mitigating the water pollution problems from industrial and agricultural activities. Using this process, the goal is to eliminate organic contaminants, improve water quality, reduce risks to public health, and set precedents for future research.

In parallel, analytical methods will be used as analysis tools to measure the concentration of certain specific contaminants in water samples. These methods are valuable for the detection and quantification of contaminants, providing accurate data on the effectiveness of the treatment, and helping to adjust the conditions of the advanced oxidation process.

The results reflected improved water quality, which makes possible a reduction of contaminants, optimization of drinking water safety, and decrease the pathogen activity. We achieved 100% removal of the glucose proposed as a standard contaminant and 80% of the contaminants from the Rocha River. The use of pretreatments to help reduce water turbidity was recommended, and UV rays (254 nm) can be used together with ozone and hydrogen peroxide to achieve treatment.

Keywords: Advanced Oxidation, $O_3/UV/H_2O_2$, Water Treatment, Organic Contaminants, Water Quality.

Citación: Brisa N. Herrera B., Dulce J. Ramos C., Carlos M. Camacho C. **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA $O_3/UV/H_2O_2$** . Revista Científica EMINENTE 2025, 9-1: 53-63.

- ¹ Estudiante de Ciencias Básicas - Unidad Académica Cochabamba - Escuela Militar de Ingeniería
Corresponde al Autor (correo electrónico: bherrerab@est.emi.edu.bo).
- [§] Dirección de contacto Investigador primer autor: Telf.: (+591) 75229220 Cochabamba – Bolivia.
- ² Estudiante de Ciencias Básicas - Unidad Académica Cochabamba – Escuela Militar de Ingeniería
Corresponde al Autor (correo electrónico: dramosc@est.emi.edu.bo).
- [§] Dirección de contacto Investigador segundo autor: Telf.: (+591) 63237498 Cochabamba – Bolivia.
- ³ M.Sc. en Innovación y Desarrollo – Ing. Químico – Encargado del laboratorio de química – Unidad Académica Cochabamba - Escuela Militar de Ingeniería
Corresponde al Autor (correo electrónico: ccamachoc@adm.emi.edu.bo).
- [§] Dirección de contacto Investigador Tercer autor: Telf.: (+591) 70369148 Cochabamba – Bolivia

INTRODUCCIÓN

El uso sustentable de agua sugiere la necesidad de desarrollar tecnologías que eliminen los contaminantes de forma rápida y además que sean limpias y eficientes (Manzollillo, 2020). En los últimos años el incremento de la polución de compuestos persistentes en regiones de Latinoamérica es una preocupación, debido a que estos generan daño al ecosistema y a la salud humana, entre ellos se tiene a los antibióticos (Meléndez-Marmolejo et al., n.d.), surfactantes (Costa Moreira et al., 2013), plaguicidas (Escobar & García Calvo, 2019), componentes orgánicos clorados, bromados (Cáceres Davalos et al., 2022) entre otros, por lo que la búsqueda de tratamientos más allá de los convencionales es crucial para mitigar este impacto que está provocando la actividad antropogénica (Madera López & Vilorio Soto, n.d.).

Una alternativa posible son los procesos de oxidación avanzada basados en $O_3/H_2O_2/UV$ (ozono/peróxido de hidrógeno, luz ultravioleta 254 nm), el cuál utiliza energía y reacciones de oxidación para realizar el tratamiento en un ambiente homogéneo (López Ramírez et al., 2021). Desde un punto de vista químico la aplicación de O_3 y UV con ayuda del peróxido de hidrógeno genera radicales hidroxilos disminuyendo el uso de reactivos adicionales en el tratamiento (G. Covinich et al., 2014). Además, los costos operativos de este tipo de tecnologías están decreciendo considerablemente (Boczkaj & Fernández, 2017), abriendo oportunidades de investigación, generando nuevas propuestas de mejora para la mitigación de aguas contaminadas con residuos industriales líquido o domésticos.

La efectividad del uso de $O_3/H_2O_2/UV$ varía según el tipo de contaminante que se desea tratar (Alaton et al., 2002a; Kusic et al., 2006), (Chandrasekara Pillai et al., 2009; Zangeneh et al., 2014), teniendo cuidado con la caracterización fisicoquímica del agua a tratar. La descomposición de contaminantes con este método se puede detallar: Contaminante – variable a controlar

- Fenol – pH (Biñ & Sobera-Madej, 2012)
- Tintes – Dosis de ozono (Alaton et al., 2002b)
- Orto-toluidina – pH, H_2O_2 , concentración inicial del contaminante (Shokri et al., 2016)

- Antibióticos – Revisión de varias variables (Mahdi et al., 2021)

Algunos logros señalan que el uso de esta combinación da excelentes resultados en un río llegando a eliminar entre 10 a 88% de los contaminantes presentes (Goncharuk et al., 2009; Lee et al., 2011). En contexto, Bolivia posee ríos bastante contaminados desde hace varias décadas atrás, por diversas fuentes (FAO, 1990). Al ser muy variadas las diferentes etapas para la reducción de la contaminación en estos cuerpos de agua hace compleja su ejecución.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los procesos de oxidación avanzada ($O_3/UV/H_2O_2$) para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el Río Rocha.

METODOLOGÍA

1.- MUESTREO

Se realizó muestreo puntual en el río Rocha en las coordenadas (-17.378457°, -66.148064°), en la Fig. 1 se ilustra el punto y lugar de muestreo, donde se tomaron muestras de agua para la prueba del tratamiento en el laboratorio. El objetivo de obtener la muestra en condiciones de flujo constante fue minimizar la interferencia de sedimentos y partículas en suspensión, lo que mejoraría la representatividad de la muestra.

Figura 1. Lugar y punto de muestreo



Fuente: Elaboración propia

2.- PARAMETROS:

Se incluyeron la medición de pH (APHA – AWWA-WPCF – 4500 H+), turbidez (APHA – AWWA-WPCF – 2130 B), demanda química de oxígeno (DQO) método estandarizado de la EMI U.A. Cochabamba.

Determinación de DQO

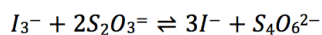
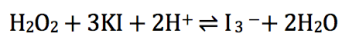
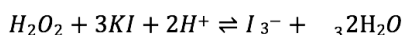
Para la determinación de DQO la Composición del reactivo proporcionado por HANNA Instruments, es HgSO_4 , H_2SO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y Ag_2SO_4 (HI93754B-25 (rango medio)) para 2 mL de muestra. Se debe llevar a digestión por 2 h a 150°C enfriar protegido de la luz y leer la absorbancia a 610nm.

Determinación de H_2O_2

El procedimiento de determinación de peróxido de hidrógeno se basó según (Solvay Chemicals, 2019).

El principio del método es que el ion yoduro que está en exceso reacciona con el yodo formado por la reacción con el peróxido de hidrógeno y se genera ion triyoduro el cual luego es titulado con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio.

Para lograr la determinación se debe tomar entre 5 a 20 mL de muestra, adicionar 25 mL de agua destilada, 20 mL de solución de H_2SO_4 2N y 25 mL de KI 0.2N. Esperar unos minutos a que se forme el color y titular con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta un amarillo pálido, añadir 1 mL de indicador de almidón y titular hasta que sea transparente.



$$C_{\text{H}_2\text{O}_2} [\text{mg/L}] = N_{\text{S}_2\text{O}_3^{2-}} / 2 * V_{\text{S}_2\text{O}_3^{2-}} (\text{mL}) \cdot 34000 / V_M (\text{mL})$$

Dónde:

$N_{\text{S}_2\text{O}_3^{2-}}$ = Normalidad del tiosulfato de sodio

$V_{\text{S}_2\text{O}_3^{2-}} (\text{mL})$ = Volumen del titulante de tiosulfato de sodio [mL]

$V_M (\text{mL})$ = Volumen de muestra [mL]

Condiciones operativas

La estabilidad del sistema fue probada en un laboratorio con temperaturas controladas. La

eficiencia del proceso se evaluó analizando el tiempo de exposición de la muestra al ozono, variación de la concentración de peróxido de hidrógeno, radiación ultravioleta (UV) y tiempo de residencia de la mezcla en el sistema. La concentración de H_2O_2 se ajustó en función de la carga de contaminantes con una relación molar de $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{DQO}]=1$, la potencia de la lámpara UV fue de 6W, la concentración del ozono se tomó en saturación.

Parámetros de evaluación de eficiencia

Se analizó la tasa de eliminación de contaminantes específicos midiendo la reducción de los niveles de DQO y H_2O_2 después de cada fase de tratamiento en intervalos de 15 min.

3.- MONTAJE DEL REACTOR

En la Fig. 2 se observa el montaje del reactor que a continuación se detalla.

Análisis fisicoquímico previo

Se analiza los parámetros de pH, turbidez (inicial y final después del pretratamiento) y DQO del agua a tratar.

Componentes del reactor

El volumen de agua fue de 400 mL, utilizando como reactor una probeta de vidrio. Recubierta con papel aluminio para evitar que la radiación UV se disipe al exterior y pueda provocar daños a los operarios al momento de tomar la muestra.

Inyección de ozono

Se utilizó 10% del generador de ozono. El O_3 se inyecta en la probeta a través de una manguera de silicona conectada al generador y se espera 2 minutos, se agrega la dosis de H_2O_2 y se dispersa uniformemente en la solución para maximizar el contacto inicial con los contaminantes.

Adición de Radiación UV

Dentro la probeta, se colocó dentro de un tubo una fuente de luz UV que emita la longitud de onda óptima para que el H_2O_2 forme radicales hidroxilos.

La lámpara UV debe colocarse de manera que el haz cubra la mayor parte de la solución, asegurando una exposición uniforme durante todo el ciclo de tratamiento.

Figura 2. Reactor en funcionamiento



Fuente: Elaboración propia

Período de experimentación

El período experimental consistió en un total de 60 minutos, durante los cuales se tomaron 5 muestras de la solución tratada cada 15 minutos. Esto permite monitorear la evolución de los contaminantes durante el proceso de oxidación y evaluar los cambios en la eficiencia del sistema a lo largo del tiempo, las muestras se observan en la Fig. 3.

Figura 3. Muestras a diferentes tiempos



Fuente: Elaboración propia

4.- PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA DE AGUA

El pretratamiento de la muestra del agua del Rio Rocha consiste en eliminar los sólidos en suspensión con ayuda de una membrana como se ilustra en la Fig. 4, para que el tratamiento con oxidación avanzada $O_3/UV/H_2O_2$, sea más eficiente.

Figura 4. Pretratamiento filtración por membrana



Fuente: Elaboración propia

Objetivos del Pretratamiento (CONAGUA, 2019; MAGUA & Escuela de organización industrial, 2015)

- Quitar partículas grandes: Eliminamos partículas visibles o más grandes (como arena o pedazos de hojas) que podrían obstruir los equipos usados en el tratamiento.
- Reducir contaminantes iniciales: Disminuimos la cantidad de contaminantes menos persistentes (que son más fáciles de eliminar) para que el tratamiento principal se enfoque en los contaminantes más difíciles de remover.
- Ajustar el pH: El pH (nivel de acidez o alcalinidad) del agua afecta la generación de radicales hidroxilos en el tratamiento y asegurar que el peróxido de hidrógeno funcione de manera óptima.
- Remover sustancias que compiten por los radicales: Algunos elementos presentes en el agua pueden reaccionar con los radicales antes de que estos lleguen a los contaminantes de interés.

Etapas del Pretratamiento

Aquí detallamos las principales etapas que suelen incluirse en el pretratamiento (Metcalf & Eddy, 2023):

1. Filtración – por membrana:
2. Ajuste de pH:
3. Preoxidación (opcional):

- A veces se hace una oxidación preliminar usando una pequeña cantidad de algún oxidante, como ozono o una baja dosis de peróxido de hidrógeno.
- Esta etapa ayuda a reducir ciertos contaminantes antes de entrar en el tratamiento principal, de manera que el proceso de oxidación avanzada se centre en los contaminantes más difíciles.

Beneficios del Pretratamiento

- Aumenta la eficacia del tratamiento principal: Al reducir la cantidad de partículas y sustancias fáciles de eliminar, el proceso de oxidación avanzada se concentra en los contaminantes más persistentes.
- Protege el equipo: Menos partículas grandes o sustancias suspendidas significa menor riesgo de dañar o ensuciar los equipos de tratamiento.
- Ahorra recursos: Mejores condiciones en el tratamiento significan menores costos de reactivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Realizando una revisión de la bibliografía y comparando los resultados de los experimentos se puede sugerir las siguientes preguntas y respuestas que se encontraron para este proceso.

¿Qué es el proceso $O_3/UV/H_2O_2$?

Según (Shokri et al., 2016) Este proceso es una técnica de oxidación avanzada que utiliza tres elementos:

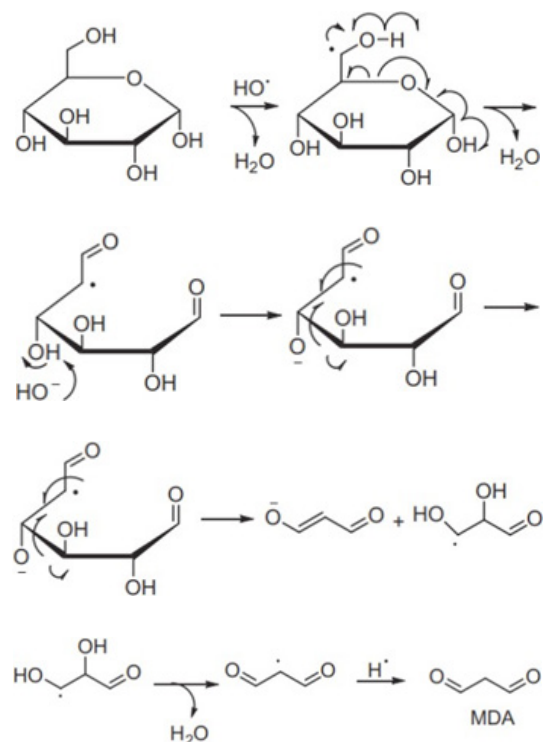
- Oxígeno (O_3): Facilita la generación de radicales cuando interactúa con la luz UV y el peróxido.
- Luz ultravioleta (UV): Energiza las moléculas de peróxido (H_2O_2), haciéndolas más reactivas.
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2): Al ser activado por la luz UV, libera radicales hidroxilos ($OH^\bullet$), que son partículas muy reactivas que atacan y descomponen contaminantes.

¿Cómo interactúa la DQO en este proceso?

(Rodríguez Peña et al., 2020)

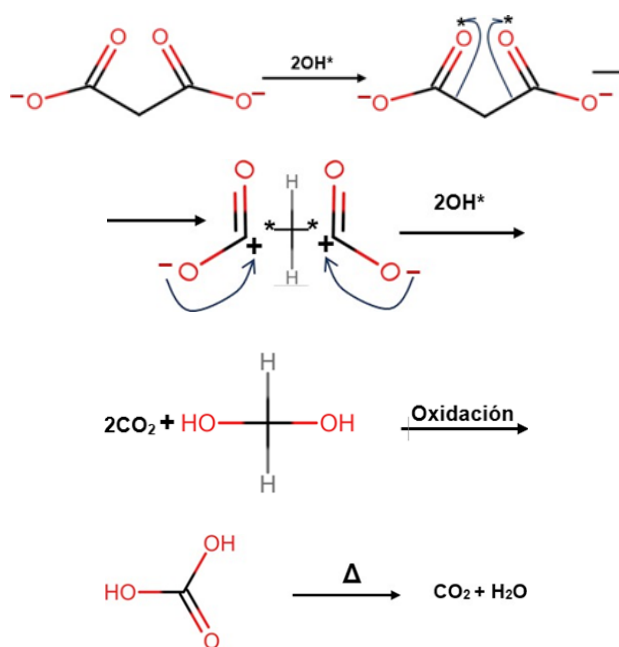
- Medición inicial de la DQO: Antes de comenzar el tratamiento, se determina la DQO en el agua para conocer la cantidad de compuestos orgánicos que necesita ser oxidada y la concentración de reactivos necesaria.
- Proceso de oxidación: La combinación de O_3 , luz UV y H_2O_2 genera los radicales hidroxilos ($OH^\bullet$). Estos radicales hidroxilos son partículas que “atacan” las moléculas de los contaminantes, rompiéndose en fragmentos más pequeños o en sustancias inofensivas (como dióxido de carbono y agua).
- Reducción de la DQO (Glucosa): A medida que el tratamiento progresa y los contaminantes se descomponen, la DQO disminuye. Para el caso de la glucosa se tiene en la Fig. 5 la descomposición hasta malondialdehído según (Villamena, 2017). Y en la Fig. 6 la propuesta que es el resultado de oxidar el MDA (malón dialdehído) para la descomposición final a agua y dióxido de carbono.

Figura 5. Reacción del radical hidroxilo con la glucosa



Fuente: Capítulo 2 - Química de las especies reactivas, Detección de especies reactivas en biología (Villamena, 2017)

Figura 6. Propuesta de descomposición del MDA



Fuente: Elaboración propia

¿Por qué es importante el H_2O_2 en este proceso?

(Rodríguez Peña et al., 2020)

El peróxido de hidrógeno actúa como un “precursor” de los OH^* . Bajo condiciones específicas, como la exposición a la luz UV, el H_2O_2 se descompone para formar estos radicales. Este proceso tiene varios beneficios:

- Alta capacidad oxidante: Tienen un potencial de oxidación mayor al de otros oxidantes comunes, como el cloro. Esto significa que pueden degradar contaminantes que otros tratamientos no pueden.
- Generación acelerada de radicales: A través de la exposición a UV, se puede controlar la cantidad de H_2O_2 descompuesto, generando radical hidroxilo según sea necesario para la carga de contaminantes en el agua.

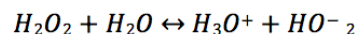
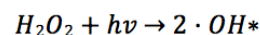
Etapas del proceso en el sistema $O_3/UV/H_2O_2$

1. Preparación y adición de H_2O_2 : (Lucas et al., 2010):
 - Se añade una concentración específica de H_2O_2 al agua contaminada. Es importante no exceder la cantidad óptima, ya que demasiado H_2O_2 puede llevar a una auto

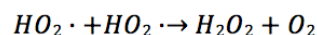
competencia entre los radicales, lo cual reduce la eficiencia del proceso.

2. Irradiación UV y descomposición de H_2O_2 :

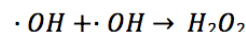
- El agua tratada con H_2O_2 pasa a través de un sistema de lámparas UV una longitud de onda alrededor de 254 nm, para iniciar las reacciones según:



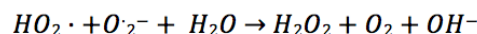
$$pK = 11.65$$



$$k = 8.3 \times 10^5 (M^{-1}s^{-1})$$

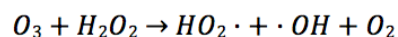
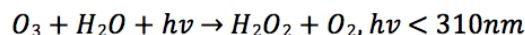


$$k = 4.2 \times 10^9 (M^{-1}s^{-1})$$



$$k = 9.7 \times 10^7 (M^{-1}s^{-1})$$

Inyección del ozono



$$k = 6.5 \times 10^{-2} (M^{-1}s^{-1}) \text{ muy lento}$$

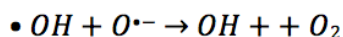
Oxidación de contaminantes:

- Los radicales hidroxilos generados reaccionan inmediatamente con los contaminantes orgánicos presentes en el agua fragmentando su estructura hasta generar, CO_2 , H_2O y otros subproductos menos dañinos.
- Este proceso continúa hasta que los contaminantes son reducidos a niveles no tóxicos, completamente eliminados y se llega a compuestos no oxidables.

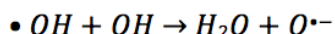
Papel del oxígeno (O_2) en el proceso:

La presencia de O_2 ayuda a mantener la cadena de generación de radicales y potencia la oxidación. El O_2 disuelto en el agua permite la regeneración de ciertos

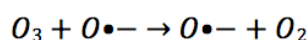
intermediarios que se producen en las reacciones de oxidación y contribuyen a crear un entorno donde los radicales $\bullet OH$ pueden mantenerse activos por más tiempo considerando las siguientes reacciones químicas.



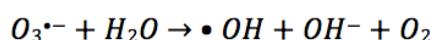
$$k = 1 \times 10^{10} (M^{-1} s^{-1}), pH = 7.9.$$



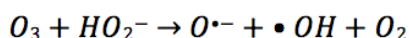
$$k = 1.3 \times 10^{10} (M^{-1} s^{-1})$$



$$k = 1.6 \times 10 (M^{-1} s^{-1})$$



$$k = 9.4 \times 10^7 (s^{-1})$$

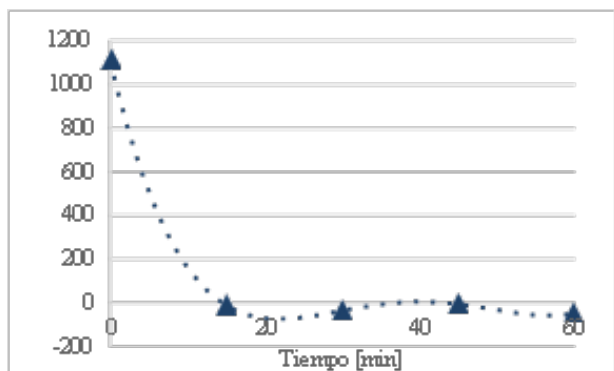


$$k = 5.5 \times 10^6 (M^{-1} s^{-1})$$

Resultados de las pruebas experimentales

La descomposición de la glucosa se muestra en la gráfica 1 en función a la DQO de la solución.

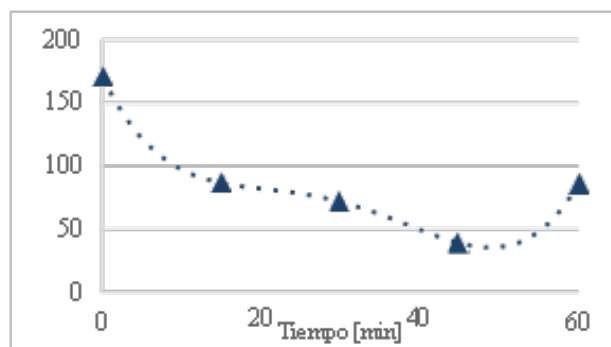
Gráfica 1. Descomposición de la glucosa en el tiempo



Los datos graficados son exclusivamente de la degradación de la glucosa, sin la influencia que tienen en el valor de la DQO que tienen el ozono y el peróxido. Se observa que en poco más de 15 minutos se llega a 100% de remoción.

El agua pretratada del río Rocha se aplicó las mismas condiciones que para la glucosa, ilustrando los resultados en la gráfica 2.

Gráfica 2. Degradación de contaminación orgánica del Río Rocha



Se observa que la mayor remoción con el proceso es cercada al 80% en aproximadamente 45 min. La subida en la parte final puede deberse a que los componentes oxidantes empezaron a saturar el medio y por las características del método se pudo detectar su presencia.

La diferencia entre los resultados de la glucosa y el agua residual real es que al tener una variedad extrema de contaminantes estos tienen velocidades de reacción y selectividad diferentes, por lo que algunos componentes reaccionaron por completo antes de que otros puedan eliminarse.

RECOMENDACIONES

Se recomienda expandir el análisis fisicoquímico a metales pesados y contaminantes emergentes como fármacos y pesticidas, los cuales son cada vez más comunes los cuerpos de agua de regiones agrícolas e industriales. Incluir estos tipos de compuestos permitirá evaluar la efectividad y adaptabilidad del proceso de oxidación avanzada $O_3/UV/H_2O_2$ en diferentes condiciones y fuentes de aguas, asegurando un tratamiento integral que responda a las necesidades ambientales locales y garantice una mayor protección para la salud pública y el ecosistema.

Verificar los métodos para cuantificar los agentes oxidantes presentes en el medio para que estos datos sean lo más veraces posibles y no existe variabilidad en las determinaciones con aguas residuales reales.

Una vez validado este método en Cochabamba, podría adaptarse y aplicarse en otras regiones de Bolivia que presentan desafíos similares de contaminación hídrica. Esto requerirá estudios e investigaciones futuras aplicando lo aprendido en el contexto boliviano con escalamientos, diferentes diseños de los reactores para aumentar el tiempo de residencia del ozono, fuentes de luz UV y variación de parámetros como pH, la relación molar $[DQO]/[H_2O_2]$, temperatura, partículas en suspensión, entre otros.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alaton, I. A., Akme Mehmet Balcioglu, I., & Bahnemann, D. W. (2002a). Advanced oxidation of a reactive dyebath effluent: comparison of O_3 , H_2O_2 /UV-C and TiO_2 /UV-A processes. In *Water Research* (Vol. 36).
- [2] Alaton, I. A., Akme Mehmet Balcioglu, I., & Bahnemann, D. W. (2002b). Advanced oxidation of a reactive dyebath effluent: comparison of O_3 , H_2O_2 /UV-C and TiO_2 /UV-A processes. In *Water Research* (Vol. 36).
- [3] Biñ, A. K., & Sobera-Madej, S. (2012). Comparison of the Advanced Oxidation Processes (UV, UV/ H_2O_2 and O_3) for the Removal of Antibiotic Substances during Wastewater Treatment. *Ozone: Science and Engineering*, 34(2), 136–139. <https://doi.org/10.1080/01919512.2012.650130>
- [4] Boczkaj, G., & Fernandes, A. (2017). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 320, pp. 608–633). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.084>
- [5] Caceres Davalos, J. C., Puente La Vega, T. O., & Ugarte Alvan, C. A. (2022). Remediación ambiental de contaminantes orgánicos persistentes mediante el uso de nanomateriales biofabricados para su adsorción: Revisión sistemática. Universidad César Vallejo.
- [6] Chandrasekara Pillai, K., Kwon, T. O., & Moon, I. S. (2009). Degradation of wastewater from terephthalic acid manufacturing process by ozonation catalyzed with Fe^{2+} , H_2O_2 and UV light: Direct versus indirect ozonation reactions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 91(1–2), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.05.040>
- [7] CONAGUA. (2019). Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Comisión Nacional del Agua. In *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. www.conagua.gob.mx
- [8] Costa Moreira, J., Simões Gonçalves, E., & Beretta, M. (2013). Contaminantes emergentes. *Revista Química Industrial*, 738, 4–13. <http://www.ufrgs.br/bioetica/precau.htm>
- [9] Escobar, A. M., & García Calvo, E. (2019). Contaminantes emergentes: Origen y destino. Universidad de Alcalá y Universidad de Rey Juan Carlos.
- [10] FAO. (1990). La contaminación acuática en Bolivia. La Contaminación de Las Aguas Continentales de Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panamá, Perú y Venezuela. <https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/aquaculture/a0844t/docrep/008/T0311S/T0311S01.htm#ch3.1>
- [11] G. Covinich, L., I. Bengoechea, D., J. Fenoglio, R., & C. Area, M. (2014). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment in the Pulp and Paper Industry: A Review. *American Journal of Environmental Engineering*, 4(3), 56–70. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20140403.03>
- [12] Goncharuk, V. V., Vakulenko, V. F., Shvadchina, Y. O., Sova, A. N., & Sitnichenko, T. N. (2009). Impact of hydrogen peroxide on the destruction degree of fulvic acids and organic impurities of river water by ozone, UV radiation, and O_3 /

- UV treatment. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 31(2), 81–91. <https://doi.org/10.3103/S1063455X09020027>
- [13] Kusic, H., Koprivanac, N., & Bozic, A. L. (2006). Minimization of organic pollutant content in aqueous solution by means of AOPs: UV- and ozone-based technologies. *Chemical Engineering Journal*, 123(3), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.07.011>
- [14] Lee, E., Lee, H., Kim, Y. K., Sohn, K., & Lee, K. (2011). Hydrogen peroxide interference in chemical oxygen demand during ozone based advanced oxidation of anaerobically digested livestock wastewater. *Int. J. Environ. Sci. Tech*, 8(2), 381–388.
- [15] López Ramírez, M. A., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. del R., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76–87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- [16] Lucas, M. S., Peres, J. A., & Li Puma, G. (2010). Treatment of winery wastewater by ozone- based advanced oxidation processes (O₃, O₃/UV and O₃/UV/H₂O₂) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. *Separation and Purification Technology*, 72(3), 235–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.01.016>
- [17] Madera López, D., & Viloria Soto, M. F. (n.d.). Contaminantes emergentes en diferentes matrices de agua y tratamientos alternativos para su eliminación. Universidad de Córdoba.
- [18] MAGUA, & Escuela de organización industrial. (2015). *Pretratamientos / Aguas*. <http://www.eoi.es>
- [19] Mahdi, M. H., Mohammed, T. J., & Al-Najar, J. A. (2021). Advanced Oxidation Processes (AOPs) for treatment of antibiotics in wastewater: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 779(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012109>
- [20] Manzollillo, B. (2020). Uso de Tecnologías Limpias para el tratamiento de aguas residuales urbanas. *Revista TEKHNE*, 23(3), 11–20.
- [21] Meléndez-Marmolejo, J., García-Saavedra, Y., Galván-Romero, V., Díaz De León- Martínez, L., Vargas-Berrones, K., Mejía- Saavedra, J., & Flores Ramírez, R. (n.d.). Emerging contaminants. Environmental problems associated with antibiotic use. New detection and remediation techniques and legislative perspectives in Latin America.
- [22] Metcalf, & Eddy. (2023). *Charter 6 y 7: Operaciones Físicas Unitarias y Procesos Químicos Unitarios*. In *Ingeniería de las aguas residuales: Tratamiento y reúso* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [23] Rodríguez Peña, M., Barrera Díaz, C. E., & Comps. (2020). Universidad Autónoma del Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [24] Shokri, A., Mahanpoor, K., & Soodbar, D. (2016). Degradation of Ortho-Toluidine in petrochemical wastewater by ozonation, UV/O₃, O₃/H₂O₂ and UV/O₃/H₂O₂ processes. *Desalination and Water Treatment*, 57(35), 16473–16482. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1085454>
- [25] Solvay Chemicals, Inc. (2019). Hydrogen peroxide. Concentration Determination 0.1-5% Technical Data Sheet. www.solvay.com
- [26] Villamena, F. A. (2017). Chapter 2 - Chemistry of Reactive Species. In F. A. Villamena (Ed.), *Reactive Species Detection in Biology* (pp. 13–64). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420017-3.00005-0>
- [27] Zangeneh, H., Zinatizadeh, A. A. L., & Feizy, M. (2014). A comparative study on the performance of different advanced oxidation

processes (UV/O₃/H₂O₂) treating linear alkyl benzene (LAB) production plant's wastewater. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20(4), 1453–1461. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.031>.



Brisa Nikole Herrera Betancur.

Estudiante de Ciencias Básicas – Ingeniería Agroindustrial de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica Cochabamba.



Dulce Jazmín Ramos Coria.

Estudiante de Ciencias Básicas – Ingeniería Agroindustrial de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica Cochabamba.



Carlos Marcelo Camacho Caero.

Ingeniero Químico titulado de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba-Bolivia. Tiene Maestría Científica e n Innovación y Desarrollo (ASDI-UMSS).

Es Encargado de Laboratorio de Química de la Unidad de

Investigación Ciencia y Tecnología de la Escuela Militar de Ingeniería Unidad Académica Cochabamba.