

# Tratamiento de efluentes de un rastro municipal mediante Procesos de Oxidación Avanzada

Carlos Javier Escudero Santiago\*, David Hernández Pulido, Luis Elías Alatorre Barajas, Diego Alejandro López Chávez, José Pedro Volquarts Huerta

*Departamento de Biotecnológicas y Ambientales, Universidad Autónoma de Guadalajara, Avda. Patria 1201, Zapopan, Jalisco, CP 45129*

*Fecha de recepción: 9 de noviembre de 2021 - Fecha de aceptación: 26 de enero de 2022*

## Resumen

Esta investigación se enfoca en encontrar una propuesta de tratamiento de uno de los efluentes que desafortunadamente se descarga a varios ríos en México. Los resultados de este estudio condujeron a una eliminación de la DQO cercana al 40% con la sedimentación de la muestra y los procesos no fotoquímicos empleando 500 mg/L de  $\text{FeSO}_4$  y 1000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a pH de 4 y 5 permitieron la eliminación de 93% de la DQO y más de 95% de los SST. Se elige la experimentación a pH de 5 como la mejor del tratamiento Fenton que conduce a un 82% de mineralización. En cuanto a los resultados de los tratamientos vía foto-Fenton se obtiene que los experimentos con luz solar promueven mejores eliminaciones de SST respecto a los de iluminación artificial con sistemas tipo LED. No obstante, se elige la prueba con luz solar directa la más eficiente de esta etapa consiguiendo una eliminación de 94% de la DQO, alrededor de 90% de SST y 84% del carbono orgánico disuelto.

Por lo tanto, el tratamiento de este tipo de muestras de alta carga de materia orgánica y sólidos ( $> 10,000$  mg/L de DQO y  $> 4,000$  mg/L de STT) puede conducirse con el proceso foto-Fenton promovido con luz solar, lo que implica una solución sostenible al usar energía limpia como la luz natural que además reduce costos de tratamiento.

## Slaughterhouse wastewater treatment through advanced oxidation processes

### Abstract

This research is focused on finding a treatment proposal for one of the effluents that unfortunately is discharged into several rivers in Mexico. The results of this study led to an elimination of COD close to 40% applying the sedimentation of the sample, the non-photochemical processes using 500 mg/L of  $\text{FeSO}_4$  and 1000 mg / L of  $\text{H}_2\text{O}_2$  at pH 4 and 5 allowed up to 93% of COD removal and more than 95% of TSS elimination. Experimentation at pH 5 is chosen as the best of the Fenton treatment leading to 82% mineralization. Regarding the results of the treatments via photo-Fenton, it is obtained that the experiments with sunlight promote better elimination of TSS compared to

---

\*carlos.escudero@edu.uag.mx

those of artificial lighting with LED-type systems. However, the test with direct sunlight is chosen as the most efficient of this stage, achieving a removal of 94% of COD, around 90% of TSS and 84% of dissolved organic carbon.

Therefore, the treatment of this kind of samples of high concentration of organic matter and solid matter and solids (> 10,000 mg/L COD and > 4,000 mg/L of STT) can be conducted with the photo-Fenton process promoted with sunlight, which implies a sustainable solution by using clean energy such as natural light that also reduces treatment costs.

### Palabras claves

Fenton, Foto-Fenton, Agua residual de rastro, Concentrador solar parabólico, Materia orgánica

### Keywords

Fenton, Photo-Fenton, Slaughterhouse wastewater, Solar parabolic concentrator, Organic matter

### Introducción

La actividad agroindustrial representa un rubro importante a nivel mundial desde el punto de vista económico y social. Sin embargo, a la par se generan problemas de carácter ambiental debido a la gran cantidad de residuos que se generan propios de este sector, tal como el agua residual (AR) de los rastros municipales producto del sacrificio de animales, limpieza de las instalaciones del matadero y el procesamiento de carne (Bustillo-Lecompte y Mehrvar, 2015). Los efluentes de rastros municipales contienen una alta concentración de sólidos gruesos, contenido de materia orgánica que incluye pelaje, grasas, sangre, etc., lo que dificulta su tratamiento (Al-Najar y Nassar, 2019).

En México existen más de 1000 instalaciones de procesamiento de carne con un consumo promedio de agua para bovino de 1000 L/ganado y para carne de cerdo alrededor de 500 L/ganado; además en la última década en el país la producción de carne bovina tuvo un incremento que implicó la generación de 1

millón de metros cúbicos de agua residual (Hurtado *et al.*, 2021). La mala gestión de los residuos generados por las actividades relacionadas con este sector provoca una grave presión a cuerpos de agua como ocurre con la región hidrológica Lerma-Santiago de la parte central de México (Hernandez *et al.*, 2018), que es considerado una de las zonas de mayor contaminación del país, incluso a nivel mundial. Los tratamientos convencionales (biológicos) pueden ser efectivos en la eliminación de contaminantes, pero requieren largo tiempo de estabilización y condiciones particulares de operación.

Una de las apuestas para la depuración de efluentes de esta naturaleza es la aplicación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), caracterizados por la generación de agentes altamente oxidantes, como el radical hidroxilo (HO•). Dentro de estos POA se incluye el proceso Fenton donde se utilizan iones de hierro (Fe<sup>2+</sup>) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en un medio acidificado, para dar lugar a las reacciones siguientes (ecuaciones 1-5) (Ameta *et al.*, 2018; Hurtado *et al.*, 2021)



Entonces, el  $\text{H}_2\text{O}_2$  puede descomponerse catalíticamente por  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  en especies de radicales oxidantes. La descomposición



Además, si a este proceso se le agrega una fuente de iluminación se tiene una fotorreducción de la especie de  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$  con la regeneración de  $\text{Fe}^{2+}$  y aumentando la



Por mucho tiempo se ha experimentado los procesos fotoquímicos mediante el uso de lámparas artificiales, sin embargo, a largo plazo esto resulta costoso y ambientalmente perjudicial. Los sistemas de iluminación tipo LED (Light Emitting Diodes) surgen como una alternativa de conversión de electricidad más eficiente en luz con poca energía convertida en calor (Escudero *et al.*, 2017). Por otro lado, se ha comprobado que, en áreas con abundante radiación solar, como es el caso de México, los procesos foto-Fenton pueden funcionar mejor bajo esta fuente de iluminación natural (Foteinis *et al.*, 2018), con lo que promovería las bases de un proceso químicos sostenible y más económico.

En esta investigación se evaluó la eficiencia de eliminación de la materia orgánica, medida como DQO, y de sólidos presentes en efluentes de un rastro municipal del centro de México tratadas vía Fenton y foto-Fenton con luz artificial usando sistemas de iluminación tipo LED y solar, con el fin de evaluar el mejor tren de tratamiento que incluya una eliminación previa de sólidos sedimentables y el posterior proceso de oxidación avanzada más eficiente.

## Metodología

En este proyecto se utilizaron muestras de agua residual provenientes de un rastro municipal

catalítica homogénea de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por iones férricos se representa por las ecuaciones (6) y (7) (Gutierrez-Mata *et al.*, 2017).

cantidad de radicales  $\text{HO}^\bullet$ , procesos que ahora se llama foto-Fenton (Gutierrez-Mata *et al.*, 2017), tal como se representa en las ecuaciones (8) y (9).

del estado de Michoacán sin ningún tratamiento previo, por lo que una vez llegado al laboratorio de investigación se sometió a su caracterización siguiendo los métodos de las Normas Mexicanas para la determinación de los parámetros básicos. Entre éstos se cuantificaron la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con reflujo cerrado usando un digestor de la marca HACH, posteriormente se aplicó un procedimiento volumétrico. Además, se determinaron los Sólidos Totales (STT), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SSed), conductividad, temperatura, pH y Carbono Orgánico Disuelto (COD) mediante un equipo TOC-L de Shimadzu Scientific Instruments.

Posteriormente se realizaron pruebas de tratamiento vía Fenton de las muestras crudas utilizando 500 mg/L de sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ , Golden Bell), 1000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en solución al 30% (J.T. Baker) con ajuste del pH a 4 y 5 utilizando ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , J.T. Baker). Estas condiciones seleccionadas fueron resultado de investigaciones previas que conducían a las mejores eficiencias experimentales (Hurtado *et al.*, 2021). Cabe señalar que todas las pruebas se realizaron con una agitación de 400 rpm durante 30 min de reacción, luego las muestras se dejaron en reposo durante más de 2 h para completar la

sedimentación total del lodo residual y poder recuperar el máximo volumen del clarificado con su consecuente caracterización.

Para evaluar la mejora del tratamiento del agua residual se aplicó una sedimentación previa de las muestras crudas del rastro municipal para retirar los sólidos precipitables mediante el uso de un cono Imhoff. Esta separación mecánica se llevó a cabo a partir de la primera hora de reposo dado los resultados obtenidos de la gráfica de sedimentación que se presenta en la sección de resultados (Figura 2). Después las muestras fueron sometidas al proceso Fenton utilizando las mismas dosis de reactivos y condiciones explicadas anteriormente.

Para la etapa de las pruebas fotoquímicas de las muestras sedimentadas se utilizaron sistemas de iluminación tipo LED empleando una barra con 9 unidades, de la marca Exulight, de 30 W.

Además, se evaluó el efecto del incremento de la incidencia fotónica usando ahora dos barras de iluminación LED. El tratamiento foto-Fenton del agua residual sedimentada también se llevó a cabo mediante luz solar directa y con iluminación solar concentrada utilizando para ello un concentrador parabólico fabricado con materiales de reúso provisto de 57 espejos hexagonales, cada uno de 5 cm x 5 cm, dando un área reflectiva de 4275 cm<sup>2</sup>. En estas últimas pruebas se monitoreó la irradiancia solar emitida en los 30 minutos de tratamiento mediante los reportes del portal electrónico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México.

El tren de tratamiento aplicado a las muestras de agua residual del rastro municipal durante la investigación aparece esquematizado en la Figura 1.

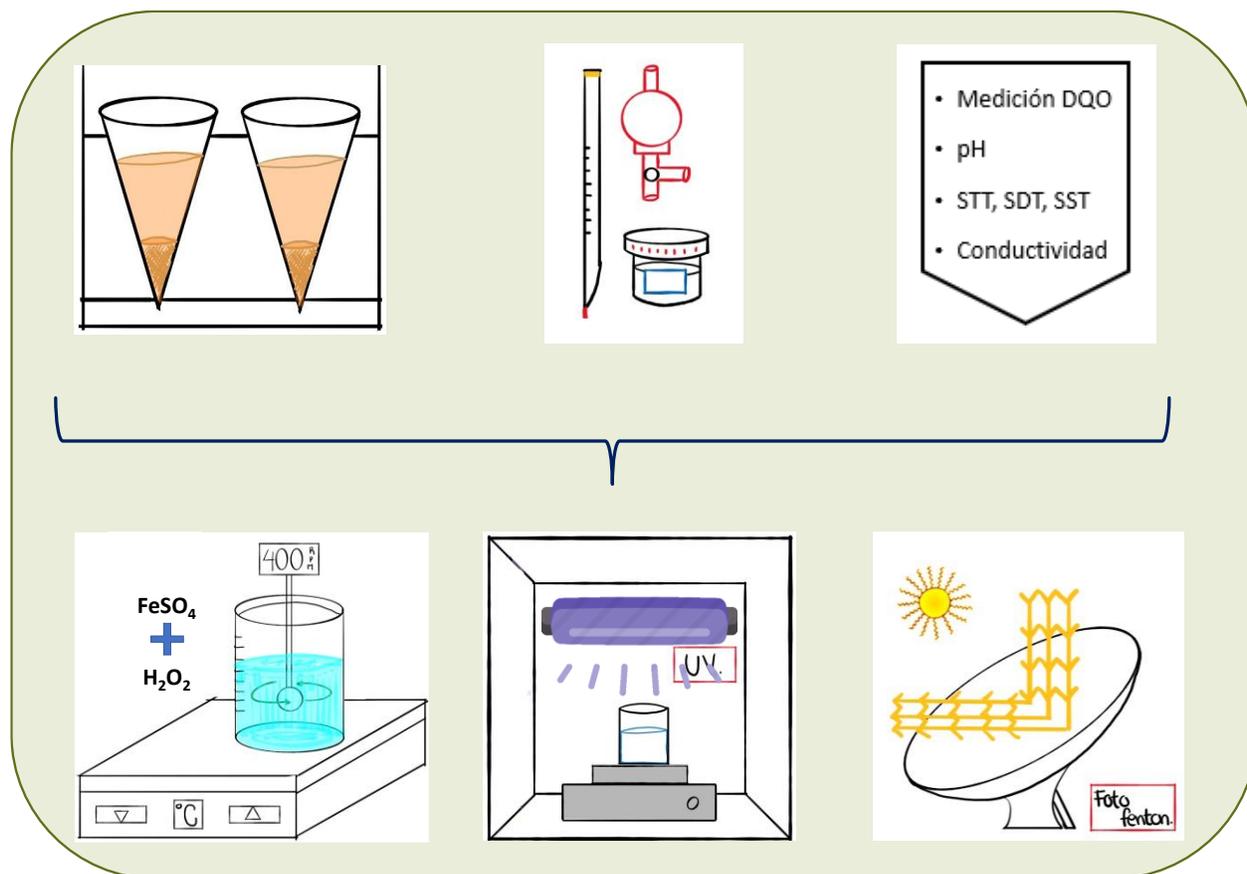


Figura 1. Esquema de la configuración experimental usada para el tratamiento del agua residual del rastro municipal.

## Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de las muestras de estudio y de los obtenidos posterior al tratamiento aplicado.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran los valores de los parámetros medidos de la calidad

del agua residual cruda proveniente del rastro municipal, donde se puede observar que este efluente presenta una concentración de materia orgánica 15 veces superior a lo que contiene un agua residual tipo doméstica, con lo que se puede corroborar la complejidad de este tipo de muestra tal como lo han señalado distintos autores (Aziz *et al.*, 2019; Gökçek and Özdemir, 2020; Hurtado *et al.*, 2021).

Tabla 1. Características fisicoquímicas de agua residual del rastro municipal.

Parámetro fisicoquímico	Normativa de referencia	Unidad de medida	Valor
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016	Adimensional	6.86 ± 0.12
Conductividad (mS/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2018	mS/cm	2.7 ± 0
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	NMX-AA-030-SCFI-2001	mg/L	12000 ± 820
Sólidos Totales (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2015	mg/L	4780 ± 159.10
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2015	mg/L	4335 ± 70.71
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2015	mg/L	410 ± 28.28
Sólidos Sedimentables (mL/L)	NMX-AA-004-SCFI-2013	mL/L	44 ± 2.83
Carbono Orgánico Disuelto	N-POC Método de Shimadzu	mg/L	1287 ± 7.80

Con los resultados de la caracterización de la muestra cruda se puede determinar que la mayor parte del contenido de sólidos se encuentran en forma disuelta, que representa en torno al 90% de la concentración de los sólidos totales.

Se conoce que los procesos Fenton y foto-Fenton operan adecuadamente a condiciones ácidas, incluso hay reportes donde se indica una máxima generación de radicales HO• a pH cercano a 3.0 (Gutierrez-Mata *et al.*, 2017;

Thomas *et al.*, 2021) aunque mucho dependerá del tipo de matriz de estudio. Sin embargo, cuando se trabaja a pH muy bajo se forman especies complejas de hierro y iones oxonios estables ( $[H_3O_2]^+$ ) que reducen la reactividad entre el  $Fe^{2+}$  y el  $H_2O_2$ , mientras que a condiciones a pH de 7 o cercano a la neutralidad se conduce a la precipitación de lodos de hierro en forma de hidróxido de hierro, lo que disminuye la efectividad del proceso (Xu *et al.*, 2020; Thomas *et al.*, 2021). Además,

valores altos de pH se tiene la autodescomposición del  $H_2O_2$  (Xu *et al.*, 2020). Por tanto, al presentar el agua residual de estudio un pH cercano a la neutralidad se justificó la posterior acidificación para las pruebas Fenton, para dejar el pH a 4 y 5.

Posteriormente, se realizó un estudio del comportamiento del contenido de sólidos sedimentables mediante la medición del lodo

generado al disponer la muestra cruda en un cono Imhoff, dado que se desconocía el tiempo óptimo de separación de los sólidos contenidos en este tipo de AR la prueba se realizó durante más de 6 horas por duplicado. Cabe mencionar que en la Figura 2 solo se grafica las concentraciones de sólidos sedimentables en las primeras 3 h dado que posterior a este tiempo se tuvo un comportamiento constante.

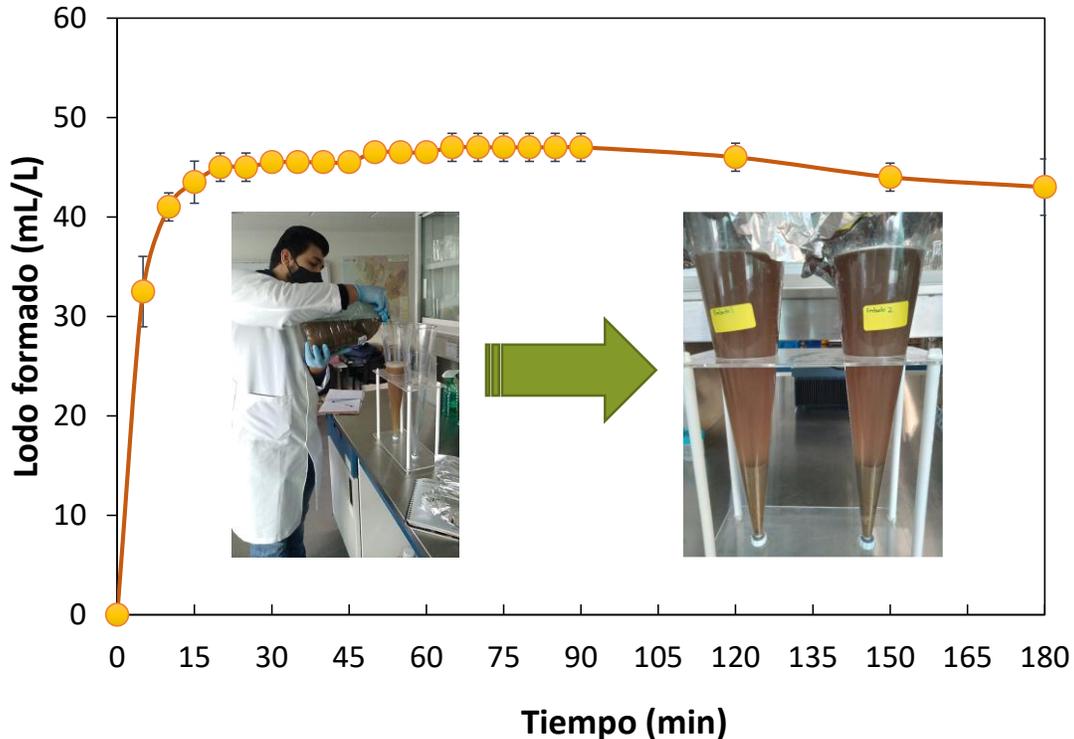


Figura 2. Comportamiento de la sedimentación de las muestras de agua de rastro cruda.

Los resultados demuestran que la máxima formación del lodo sedimentable ocurre en la primera hora de precipitación, con lo que se corrobora que el proceso no requiere más de este tiempo para alcanzar la máxima separación de los sólidos presentes, formando cerca de 45 mL/L de lodo residual.

En la Figura 3 se presentan los resultados del porcentaje de eliminación de la DQO, sólidos totales y suspendidos de las muestras crudas tratadas vía sedimentación y Fenton bajo dos valores de pH.

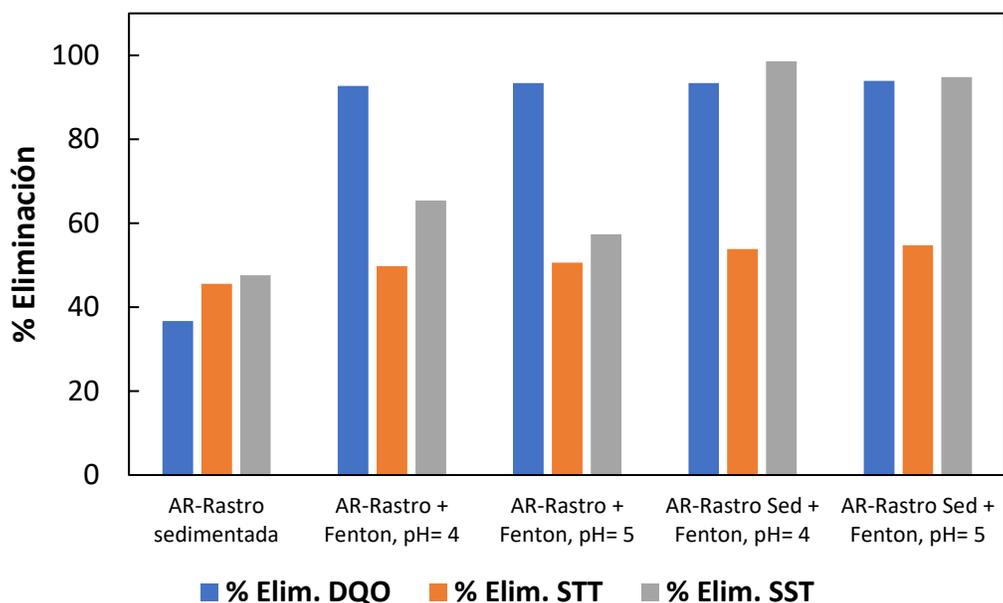


Figura 3. Comportamiento de la eliminación de la DQO, STT y SST de muestras de agua residual de rastro sin sedimentar y sedimentada tratada por proceso Fenton.  $[\text{FeSO}_4]= 500 \text{ mg/L}$ ;  $[\text{H}_2\text{O}_2]= 1000 \text{ mg/L}$ .

Aunque las reacciones de Fenton y foto-Fenton se reportan como de alta eficiencia en la oxidación de diferentes contaminantes, es preciso requerir de un pretratamiento de las muestras de agua residual para que se lleven a cabo de la manera adecuada las reacciones involucradas en tales procesos (Hurtado *et al.*, 2021; Thomas *et al.*, 2021). Por lo que en la Figura 3 se puede comprobar que con solo aplicar la separación mecánica de sedimentación se logra cerca del 40% de eliminación de la materia orgánica, mientras que el agua cruda con tratamiento Fenton alcanza en torno al 90% de eliminación de la DQO y poco más del 50% de los sólidos totales.

Las muestras sedimentadas que recibieron tratamiento con el POA no fotoquímico tuvieron una mejora en la disminución de la concentración de los SST, llegando a más del 90% de eliminación, en torno a 93% de

degradación de la DQO y hasta 55% de eliminación de los STT. Es importante recalcar que a pesar de que el pH de 4 tuvo una ligera mejora en las pruebas aplicadas respecto a la disminución de SST, estos resultados no reflejan una mayor efectividad en la eliminación de la DQO, y al tener que usar mayor reactivo para ajustar la muestra a ese nivel de pH se sugiere que se tome como condición óptima los experimentos realizados a un pH de 5. Justo lo anterior es para optimizar uso de reactivos y costos de tratamiento, que es uno de los retos de este tipo de tecnología tal como lo señalan diversos autores (Gutierrez-Mata *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2019; Thomas *et al.*, 2021).

En la Tabla 2 se muestra la caracterización fisicoquímica del clarificado formado una vez tratada con Fenton y a pH de 5 la muestra sedimentada.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de la muestra de AR-Rastro con Fenton, pH= 5, [FeSO<sub>4</sub>]= 500 mg/L; [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]= 1000 mg/L.

Parámetro fisicoquímico	AR Rastro sedimentada + Fenton
pH	4.51 ± 0.28
Conductividad (mS/cm)	2.5 ± 0
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	736 ± 58.20
Sólidos Totales (mg/L)	2 165 ± 112.69
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	1840 ± 120
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	21.5 ± 0
Sólidos Sedimentables (mL/L)	22.39 ± 2.29
Carbono Orgánico Disuelto (mg/L)	226.15 ± 3.18

Los datos de la Tabla 2 revelan que bajo las condiciones de tratamiento empleadas a pH de 5 se logra una concentración de la DQO de 736 mg/L, que a pesar de que es un valor característico de un agua residual tipo doméstica ya no representa un contenido complejo de materia orgánica respecto a la muestra cruda. Además, se tiene una baja generación de sólidos sedimentables de cerca de 22 mL/L, lo que representa una gran ventaja, dado que la generación de lodos residuales posterior a la aplicación de estos procesos representa un reto importante que atender (Gutiérrez-Mata *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2019). La concentración del COD indica un valor de 226 mg/L que representa una mineralización alta de 82%, con lo que se demuestra la efectividad del tratamiento aplicado. Existen trabajos en los que se han aplicado procesos biológicos al agua residual de rastros y se alcanzan similares resultados de eliminación del COD, sin embargo, estos sistemas operan con un tiempo de retención hidráulica de más de 1.5 días y para su estabilización se consideran periodos de 4

meses (Aziz *et al.*, 2019; Fard *et al.*, 2019; Svierzoski *et al.*, 2020).

También se puede observar de esta misma tabla que la muestra final tratada presenta un ligero descenso del valor del pH, llegando a 4.5. Tal disminución de este parámetro puede ser atribuido a la eliminación de algunos compuestos suspendidos y disueltos presentes en las muestras iniciales tal como se ha reportado en otros trabajos (Imram *et al.*, 2012)

La siguiente etapa experimental consistió en las pruebas fotoquímicas, usando iluminación artificial (con lámparas tipo LED) y natural (con el empleo de la luz solar). Al conseguir mejores resultados al someter a sedimentación previa las muestras en la etapa anterior, para estas pruebas de tratamiento vía foto-Fenton se usó el agua residual sedimentada y con un ajuste de pH de 5.

La Figura 4 detalla los resultados de eliminación de la DQO, STT y SST de las muestras de estudio usando una y dos lámparas tipo LED, usando iluminación solar directa y con el concentrador parabólico.

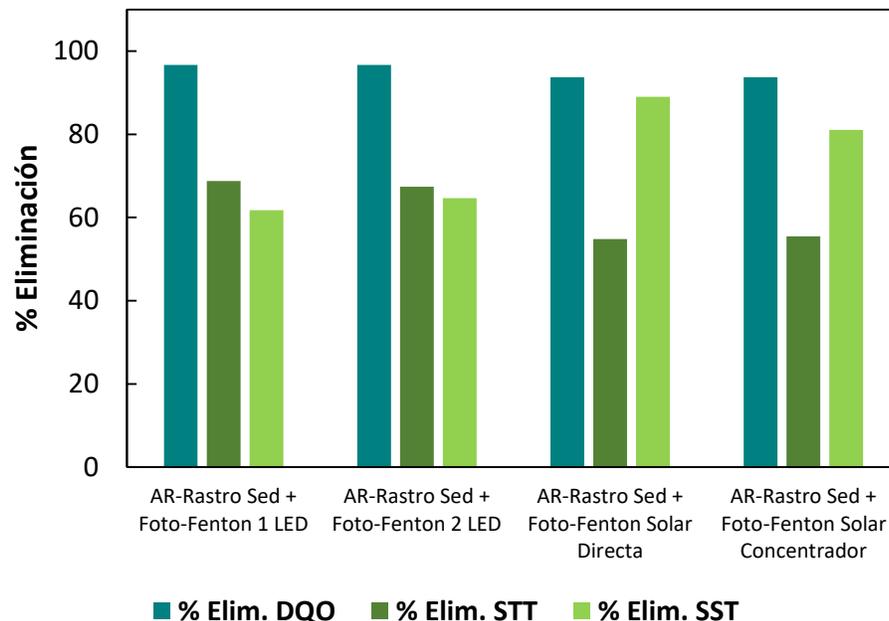


Figura 4. Comportamiento de la eliminación de la DQO, STT y SST de muestras de agua residual de rastro vía foto-Fenton con lámparas LED y con luz solar.  $[\text{FeSO}_4]= 500 \text{ mg/L}$ ;  $[\text{H}_2\text{O}_2]= 1000 \text{ mg/L}$ ,  $\text{pH}= 5$ .

Como se puede observar, en la Figura 4, con las pruebas fotoquímicas se llega a más del 94% de la eliminación de la DQO. Esta mejoría respecto a los resultados alcanzados con los procesos sin iluminación se atribuye a que con el proceso foto-Fenton la energía luminosa aplicada propicia la regeneración del  $\text{Fe}^{2+}$  que conduce a la producción de radicales  $\text{HO}^\bullet$  que oxidan la materia orgánica (Gutierrez-Mata *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2029; Thomas *et al.*, 2021). Además, bajo iluminación se tiene la ruptura del  $\text{H}_2\text{O}_2$  que lleva a la generación de especies oxidantes adicionales (Hurtado *et al.*, 2021).

Los tratamientos foto-Fenton con iluminación artificial condujeron a una ligera mejora en cuanto a la eliminación de los sólidos totales (>67%) y una reducción de la DQO del 97%, no observando una mejoría significativa al duplicar las lámparas LED. Sin embargo, usando la luz solar se llega a los mejores porcentajes de disminución de los sólidos

suspendidos de más del 80% y se obtiene 94% de eliminación de la materia orgánica, eligiendo experimentación con luz solar directa la mejor condición de esta etapa de la investigación, al propiciar cerca del 90% de eliminación de los SST.

Lo anterior, se explica debido a que bajo luz solar en el proceso foto-Fenton se tiene la generación de especies intermediarias tal como el  $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ , que es el principal complejo fotoactivo de  $\text{Fe}^{3+}$  que posteriormente se reduce a  $\text{Fe}^{2+}$ , con lo que se generan  $\text{HO}^\bullet$  adicionales aumentando así la degradación de los contaminantes presentes (Thomas *et al.*, 2021).

La temperatura es un parámetro que tiene un impacto importante en las velocidades de reacción que ocurren en el proceso foto-Fenton, dado que un aumento de la temperatura acelera la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  mediante el  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Fenton termal) con la mejora el coeficiente de

absorción de  $\text{Fe}^{3+}$ . Sin embargo, un incremento en la temperatura puede conducir a una mayor lixiviación del hierro y la consiguiente desactivación del catalizador en ciclos sucesivos (Ribeiro *et al.*, 2019). Por tal motivo, en esta investigación se evaluó el

comportamiento de la temperatura durante la etapa del tratamiento fotoquímico con luz solar.

En la Figura 5, se presenta los datos del seguimiento de la irradiancia y la temperatura de las muestras sedimentadas a las que se les aplicó el tratamiento foto-Fenton solar.

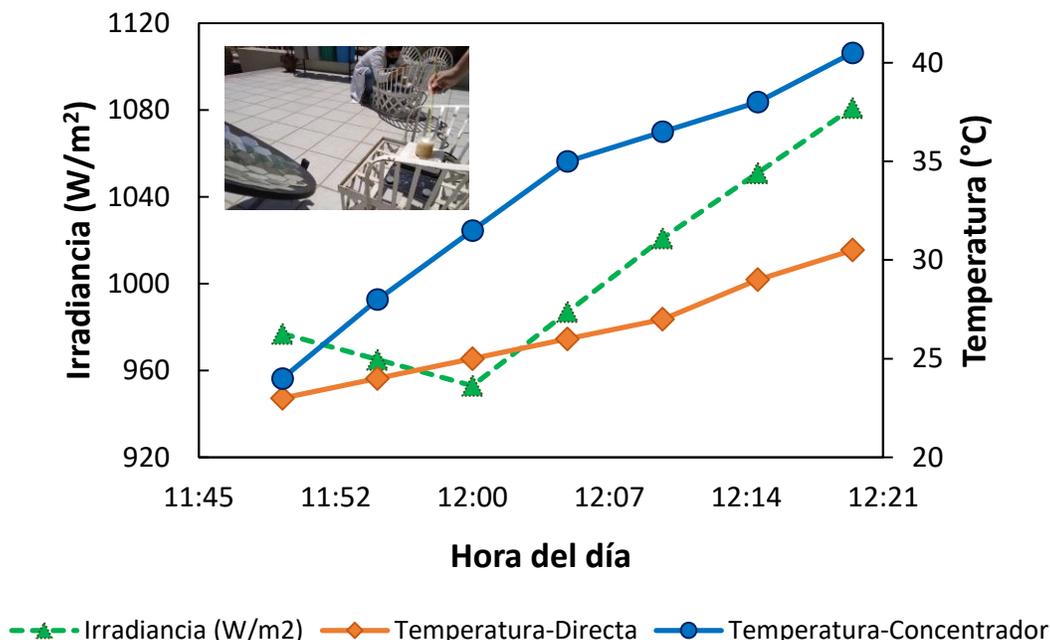


Figura 5. Comportamiento de la temperatura de la muestra e irradiancia ambiental en las pruebas foto-Fenton solar del agua residual de rastro. pH= 5,  $[\text{FeSO}_4]= 500 \text{ mg/L}$ ;  $[\text{H}_2\text{O}_2]= 1000 \text{ mg/L}$ .

Con los datos mostrados en la Figura 5, se precisa una correlación de los dos parámetros de seguimiento. Para la muestra tratada con luz solar directa la temperatura pasó de 23 °C a 31 °C, mientras que la muestra tratada con luz solar empleando el concentrador condujo a un aumento de hasta 41 °C. Algunos reportes indican que arriba de los 40 °C en el proceso foto-Fenton se presenta la descomposición térmica del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en agua y oxígeno (Ribeiro *et al.*, 2019), lo que podría afectar la efectividad del tratamiento. Con ello se explica por qué el uso del concentrador condujo a menores remociones de la materia orgánica y sólidos totales. Por lo tanto, se sugiere un monitoreo

constante de la temperatura durante la reacción y no llevar a más de 30 min el experimento pues comprometería el desempeño del proceso por un sobrecalentamiento.

A continuación, en la Tabla 3 se dan los resultados de los valores de la caracterización de la muestra tratada a pH 5 vía foto-Fenton solar con iluminación directa. Al igual que los resultados de los tratamientos no fotoquímicos la muestra final presenta un decremento en el valor de pH que se corresponde con mayores eliminaciones de sólidos disueltos totales (73%).

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la muestra de AR-Rastro con foto-Fenton con luz solar directa, pH= 5, [FeSO<sub>4</sub>]= 500 mg/L; [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]= 1000 mg/L.

Parámetro fisicoquímico	AR Rastro sedimentada + Foto-Fenton
pH	4.21 ± 0
Conductividad (mS/cm)	2.83 ± 0.04
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	758.4 ± 60.30
Sólidos Totales (mg/L)	2 159 ± 14.14
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	1 170 ± 20
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	45.02 ± 0
Sólidos Sedimentables (mL/L)	100 ± 13.57
Carbono Orgánico Disuelto (mg/L)	211.60 ± 10.61

Las pruebas de tratamiento foto-Fenton con luz solar directa resultaron favorables en la mineralización de la muestra llegando a un valor de poco más de 200 mg/L de COD que representa en torno a un 85% de eliminación de este parámetro. Esto indica la efectividad del proceso fotoquímico solar sobre el no fotoquímico lo que presume mayor generación de radicales HO<sup>•</sup>, dado que con un sistema con iluminación natural se propicia una mejor área expuesta a la irradiación para dar lugar a las reacciones involucradas en la generación de estas especies altamente oxidantes de los contaminantes (Foteinis *et al.*, 2018).

## Conclusiones

La aplicación de una sedimentación previa a los tratamientos de oxidación avanzada de las muestras de agua residual de rastro conduce a un 37% de eliminación de la DQO y 46% de STT.

Las muestras sedimentadas previamente y tratadas con proceso Fenton a pH 4 y 5 (FeSO<sub>4</sub>= 500 mg/L; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>= 1000 mg/L) alcanzaron resultados similares a las que prescindieron del tratamiento preliminar (93% de eliminación de la DQO). Sin embargo, con la sedimentación se mejora la eliminación de los SST (≥95%).

Los tratamientos fotoquímicos no condujeron a una mejora en la calidad del efluente respecto al proceso sin luz. No obstante, de las pruebas foto-Fenton se observa que con el uso de la luz solar directa se obtienen mejores resultados que los experimentos llevados a cabo con lámparas LED.

Un beneficio encontrado en el tratamiento foto-Fenton con luz solar directa fue la eliminación de aproximadamente el 90% de SST y cerca del 85% de mineralización.

Este proyecto de investigación corrobora que los procesos Fenton y foto-Fenton tienen como ventaja el corto tiempo de tratamiento, además de que estas tecnologías se pueden acoplar a otras etapas de tratamiento. Es importante comentar que el proceso foto-Fenton que condujo a mayor mineralización de la muestra respecto al proceso sin luz tiene el atractivo de que se puede operar con fuentes de iluminación sostenible, que si se tiene un adecuado control de la temperatura de reacción se pudiesen estar mejorando los resultados de esta investigación.

## Reconocimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Guadalajara por las facilidades otorgadas en la realización de este proyecto de investigación. Carlos J. Escudero extiende su reconocimiento al Dr. Germán Cuevas Rodríguez, de la Universidad de Guanajuato,

por el apoyo para algunas determinaciones analíticas.

## Referencias

- Al-Najar E., Nassar A. (2019). Slaughterhouse wastewater characteristics in the Gaza Strip. "Journal of Water Resource and Protection", 11, 844-851.
- Ameta R., Chohadia A., Jain A., Punjabi P. (2018). Fenton and Photo-Fenton Processes, Chapter 3. En "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment", Ameta S., Ameta R. (eds.), 49-87. Academic Press, Reino Unido.
- Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah, Khan, S., Farooqi, I. (2019). Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. "Science of the Total Environmental", 686, 681-708.
- Bustillo-Lecompte C., Mehrvar M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review of trends and advances. "Journal of Environmental Management", 16, 287-302.
- Escudero C., Iglesias O., Dominguez S., Rivero M., Ortiz I. (2017). Performance of electrochemical oxidation and photocatalysis in terms of kinetics and energy consumption. New insights into the p-cresol degradation. "Journal of Environmental Management", 195, 117-124.
- Fard M., Mirbagheri S., Pendashteh A., Alavi J. (2019). Biological treatment of slaughterhouse wastewater: Kinetic modeling and prediction of effluent. "Journal of Environmental Health Science and Engineering", 17, 731-741.
- Foteinis S., Monteagudo J., Durán A., Chatzisyneon E. (2018). Environmental sustainability of the solar photo-Fenton process for wastewater treatment and pharmaceuticals mineralization at semi-industrial scale. "Science of the Total Environmental", 612, 605-612.
- Gökçek, O., Özdemir, S. (2020). Optimization of the coagulation-flocculation process for slaughterhouse wastewater using response surface methodology. "Clean soil air water", 48 (7-8). doi: 10.1002/clen.202000033.
- Gutierrez-Mata A., Velazquez-Martínez S., Álvarez-Gallegos A., Ahmadi M., Hernández-Pérez J., Ghanbari F., Silva-Martínez S. (2017). Recent Overview of solar photocatalysis and solar photo-Fenton processes for wastewater treatment. "International Journal of Photoenergy", 2017, 1-27.
- Hernandez S., Diaz L., Bueno J. (2018). Potential of energy production from slaughterhouse wastewater. "Interciencia", 43, 558-565.
- Hurtado J., Valdez L., Escudero C. (2021). Solar homogeneous catalysis to the removal of organic matter from slaughterhouse effluents undergone to a prior biological process. "Water Science & Technology", 84 (9). doi.org/10.2166/wst.2021.438.

Imran Q., Hanif M., Riaz M., Noureen S., Ansari T., Bhatti H. (2012). Coagulation/Flocculation of tannery wastewater using immobilized chemical coagulants. "Journal of Applied Research and Technology", 10, 79–86.

Ribeiro A., Moreira N., Li Puma G., Silva A. (2019). Impact of water matrix on the removal of micropollutants by advanced oxidation technologies. "Chemical Engineering Journal", 363, 155-173.

Svierzoski N., Matheus M., Bassin J., Dias Y., Mahler C., Webler A. (2020). Treatment of a slaughterhouse wastewater by anoxic-aerobic biological reactors followed by UV-C disinfection and microalgae bioremediation. "Water Environment Research", 93, 6. doi: 10.1002/wer.1435.

Thomas N., Dionysiou D., Pillai S. (2021). Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances. "Journal of Hazardous Materials", 404 (Part B):124082. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124082.

Xu M., Wu Ch., Zhou Y. (2020). Advancements in the Fenton process for wastewater treatment, Chapter 4. En "Advanced Oxidation Processes-Applications, Trends, and Prospects", Bustillo-Lecompte C. (eds.), 61-78. IntechOpen, Reino Unido.