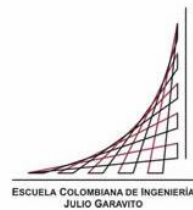


Maestría en Ingeniería Civil

**Remoción de DQO en un efluente de la industria de alimentos mediante
un proceso Foto-Fenton**

Katherine Andrea Arroyo Vanegas

Bogotá, D.C., Abril de 2019



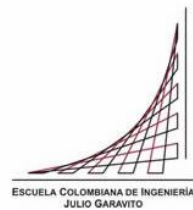
**Remoción de DQO en un efluente de la industria de alimentos mediante
un proceso Foto-Fenton**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en
Ingeniería Ambiental**

Jairo Alberto Romero Rojas

Director

Bogotá, D.C., día de Abril de 2019



La tesis de maestría titulada “Remoción de DQO en un efluente de la industria de alimentos mediante un proceso Foto-Fenton”, presentada por Katherine Andrea Arroyo Vanegas, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Director de la tesis

Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

María Paulina Villegas De Brigard

Bogotá, D.C., Abril de 2019

Dedicatoria

A quienes salen de su zona de confort
para emprender nuevos caminos.

A mi madre por ser mi apoyo
incondicional y ayudarme en las
diferentes etapas de este proyecto.

Agradecimientos

A Dios por permitirme culminar este proyecto académico y haberlo pre escrito para mi vida.

Al Ingeniero Jairo Romero por permitirme trabajar bajo su tutoría, guiarme para el desarrollo de este trabajo, compartirme su conocimiento y su constante disposición.

Al equipo de colaboradores de Gloria Colombia en Simijaca por su disposición y asistencia en la etapa de muestreos.

A la Coordinadora del Laboratorio de Ambiental por permitirme realizar los ensayos de forma constante y sus aportes en este trabajo.

Al Centro de Estudios Ambientales por darme la oportunidad de trabajar y convertir esta meta en una realidad.

A todos aquellos que tuvieron una palabra de aliento durante este proceso, me acompañaron en las diferentes etapas y levantaron mis brazos para llegar al final.

Resumen

Desarrollar alternativas de tratamiento que proporcionen efluentes de calidad para usos futuros, donde se remuevan sustancias tóxicas o recalcitrantes se ha convertido en uno de los principales objetivos de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA).

El presente trabajo evaluó a nivel de laboratorio un POA tipo Foto-Fenton, el cual se basa en el uso de iones de hierro y peróxido de hidrogeno expuestos a radiación UV, para dar lugar a la formación de radicales hidroxilo (OH^{\bullet}) que tienen la capacidad de oxidar diferentes contaminantes orgánicos e inorgánicos.

El proceso se aplicó al efluente de una industria de alimentos para evaluar la remoción de DQO. Se logró un porcentaje máximo de remoción de DQO del 80% y se estableció que las condiciones óptimas del tratamiento se obtienen con una relación molar $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{++}$ de 31:1, para un tiempo de radiación de dos horas y media a un pH de 3.

Índice general

Introducción	11
Objetivos	12
1. Marco teórico	13
1.1. Generalidades	13
1.2. Tratamientos convencionales	13
1.3. Procesos de oxidación avanzada	14
1.4. Marco normativo reúso	23
2. Metodología	25
2.1. Muestra y caracterización.....	25
2.2. Condiciones de ensayo y materiales.....	27
3. Resultados	29
3.1. Demanda Química de Oxígeno	29
4. Conclusiones y recomendaciones.....	34
5. Bibliografía	35
Anexos.....	39
a. Registro fotográfico.....	39
b. Datos mediciones DQO.....	40

Índice de tablas

Tabla 1. Potencial de Oxidación para diferentes oxidantes.....	14
Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso Foto-Fenton. (Rosales Hernandez, 2014)	19
Tabla 3. Normatividad vigente de los Países e instituciones en América. (Tello,2016)	24
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y métodos analíticos.....	26
Tabla 5. Caracterización efluente industrial.....	27
Tabla 6. Dosis Muestra 4.....	32
Tabla 8. Control Muestra 1.	41
Tabla 9. Control Muestra 2.	42
Tabla 10. Control Muestra 3.	43
Tabla 11. Control Muestra 4.	44

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de las Tecnologías de Oxidación Avanzada.	15
Figura 2. Tipo de procesos Fenton. (Soon & Hameed, 2011).....	17
Figura 3. Esquema proceso Foto- Fenton. (Cáceres, 2002)	19
Figura 4. Diagrama metodología experimental.....	25
Figura 5. Montaje experimental proceso de oxidación.	28
Figura 6. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H ₂ O ₂ y 0,67 g/L de Fe ⁺⁺ - Muestra 1.....	29
Figura 7. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H ₂ O ₂ y 0,67 g/L de Fe ⁺⁺ - Muestra 2.....	30
Figura 8. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H ₂ O ₂ y 0,83 g/L de Fe ⁺⁺ - Muestra 3.....	30
Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO, para 60 min de irradiación y diferentes relaciones H ₂ O ₂ :Fe	31
Figura 10. Porcentaje de remoción de DQO, para 150 min de irradiación y diferentes relaciones H ₂ O ₂ :Fe	31
Figura 11. Porcentaje de remoción de DQO, para 300 min de irradiación y diferentes relaciones H ₂ O ₂ :Fe	32
Figura 12. Porcentajes de remoción de DQO para la relación molar 22:1.....	33
Figura 13. Porcentaje de remoción de DQO para 4 dosis diferentes y 150 min de radiación.....	33
Figura 14. Muestra 4 – Dosis 1: 7,95 g/L de H ₂ O ₂ y 0,60 g/L – Fe ⁺⁺ (23/11/2018)	39
Figura 15. Muestra 4 – Dosis 2: 15,9 g/L de H ₂ O ₂ y 1,19 g/L – Fe ⁺⁺ (26/11/2018)	39
Figura 16. Muestra 4 – Dosis 3: 31,8 g/L de H ₂ O ₂ y 2,38 g/L – Fe ⁺⁺ (27/11/2018)	40
Figura 17. Muestra 4 – Dosis 4: 47,7 g/L de H ₂ O ₂ y 3,57 g/L – Fe ⁺⁺ (28/11/2018)	40

Índice de anexos

Anexos.....	399
a. Registro fotográfico.....	39
b. Datos mediciones DQO.....	40

Introducción

El desarrollo industrial y el crecimiento poblacional, que se vive actualmente ha llevado a un aumento en la demanda de agua potable como insumo principal para el desarrollo de cualquier actividad, lo que trae como consecuencia el incremento en la generación de aguas residuales domésticas e industriales, las cuales en su mayoría, no cuentan con un proceso de tratamiento que mejore su calidad, por el contrario son vertidas directamente sobre cuerpos hídricos, afectando la calidad de los ecosistemas en estas fuentes receptoras.

En Colombia, las aguas residuales industriales generadas, pasan por un proceso de tratamiento, en muchas ocasiones insuficiente, debido a que no logra una remoción óptima de microorganismos patógenos, nutrientes, metales pesados, materia orgánica y sólidos, generando un vertimiento que no pueda ser asimilado por la fuente receptora.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el tratamiento de un agua residual de la industria de alimentos mediante el proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton.

En el primer capítulo se presenta una breve explicación de los tratamientos convencionales, así como la necesidad de nuevas tecnologías que provean un efluente tratado de mejor calidad.

En el segundo capítulo se describe la metodología experimental diseñada y utilizada para los ensayos, se presenta el procedimiento de muestreo y las características del residuo utilizado en la fase oxidativa. Se realiza la descripción del montaje, así como de los equipos, reactivos y pasos necesarios en cada etapa.

En el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada ensayo y la comparación entre las variables de experimentación. Se realiza la evaluación del efluente para el reúso en el ciclo industrial.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones, obtenidas del proceso de experimentación.

Objetivos

Objetivo general:

Evaluar el tratamiento de un agua residual de la industria de alimentos mediante proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton.

Objetivos específicos:

- Conocer el proceso de oxidación avanzada Foto - Fenton para el tratamiento de aguas residuales.
- Realizar la caracterización del agua residual a tratar.
- Evaluar la eficiencia en remoción de DQO del agua residual tratada por el proceso Foto-Fenton.
- Determinar la tratabilidad de un agua residual de la industria de alimentos mediante el proceso Foto – Fenton.

1. Marco teórico

1.1. Generalidades

Garantizar el acceso a agua potable, como un recurso necesario para todas las actividades humanas, hace parte de los objetivos de desarrollo sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en el cual evidenciaron una disminución en la disponibilidad de agua potable a nivel mundial. Con el fin de contribuir a esta problemática se deben desarrollar soluciones y tecnologías que logren proveer agua limpia y saneamiento para todas las comunidades.

La carga contaminante vertida actualmente en las fuentes hídricas, resultado del uso doméstico e industrial del agua, ha repercutido en tal disminución. Contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados, microorganismos, sustancias recalcitrantes difíciles de remover han sido detectadas en los últimos tiempos en las aguas. Dichos contaminantes no pueden ser degradados por los procesos biológicos convencionales de aguas residuales, lo que ha llevado a buscar nuevas alternativas de tratamiento que logren producir efluentes cada vez de mejor calidad.

1.2. Tratamientos convencionales

Pretratamiento: Usualmente se encuentra en la primera etapa de las plantas de tratamiento y comprende la remoción de sólidos grandes, material inorgánico y grasas y aceites, que hacen difícil las siguientes fases de tratamiento.

Tratamiento primario: Esta etapa se basa en la remoción del material sedimentable en un 100%, contribuyendo a la remoción del 40% de sólidos suspendidos y 60% de DBO.

Tratamiento secundario: Asociado a procesos biológicos con los cuales esencialmente se degrada la materia orgánica biodegradable en solución. Estos procesos se dividen principalmente en aerobios, anaerobios y procesos combinados.

Tratamiento terciario: Convencionalmente han sido considerados como procesos de tratamiento que logran remover los contaminantes que no fueron eliminados en los tratamientos previos, sin embargo, en el caso de efluentes industriales pueden ser utilizados para remover contaminantes particulares (Caceres,2002). En este tipo de tratamiento se encuentran procesos como: adsorción, intercambio iónico, procesos de membrana, desinfección y **procesos de oxidación avanzada**.

Usualmente procesos de tratamiento primario y secundario son empleados para el tratamiento de aguas residuales urbanas, logrando reducir en su mayoría la carga contaminante, pero con la exigencia normativa cada vez más estricta, tratamientos terciarios deben ser empleados para cumplir esta pretensión y lograr producir efluentes con menor carga contaminante.

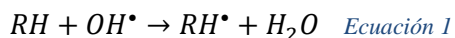
1.3. Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) se han implementado como una solución de tratamiento de aguas residuales con una alta estabilidad química o una baja biodegradabilidad, que hacen difícil su tratamiento por métodos convencionales (Poyatos et al., 2010). En los POA, los compuestos orgánicos pueden ser completamente mineralizados a dióxido de carbono y agua, principalmente por los radicales hidroxilo, el segundo agente oxidante más poderoso generado in situ en el ambiente de reacción. En la Tabla 1, se presenta el potencial de oxidación los principales agentes oxidantes, donde se observa que el radical hidroxilo libre tiene uno de los potenciales de oxidación más alto. (Ray et al, 2006).

Tabla 1. Potencial de Oxidación para diferentes oxidantes.

Nombre del oxidante	Potencial de oxidación (eV)
Flúor	3.0
Radical hidroxilo	2.8
Ozono	2.1
Peróxido de hidrógeno	1.8
Permanganato de potasio	1.7
Dióxido de cloro	1.5
Cloro	1.4

Estos radicales, tienen la capacidad de oxidar compuestos orgánicos por la abstracción de hidrógeno (Ecuación 1), o por adición electrofílica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres (R^{\bullet}), que reaccionan también con moléculas de oxígeno formando un peroxiradical, generando reacciones de degradación oxidativa que logran la mineralización del contaminante (Caceres,2002).



Sabiendo que los POA se basan en la formación del radical hidroxilo, estos procesos se diferencian según el oxidante que da lugar a la generación. En la Figura 1 se muestra que los POA pueden ser

clasificados en homogéneos, que pueden incluir el uso o no de energía o heterogéneos, según el uso de diferentes agentes catalizadores (Poyatos et al., 2010).

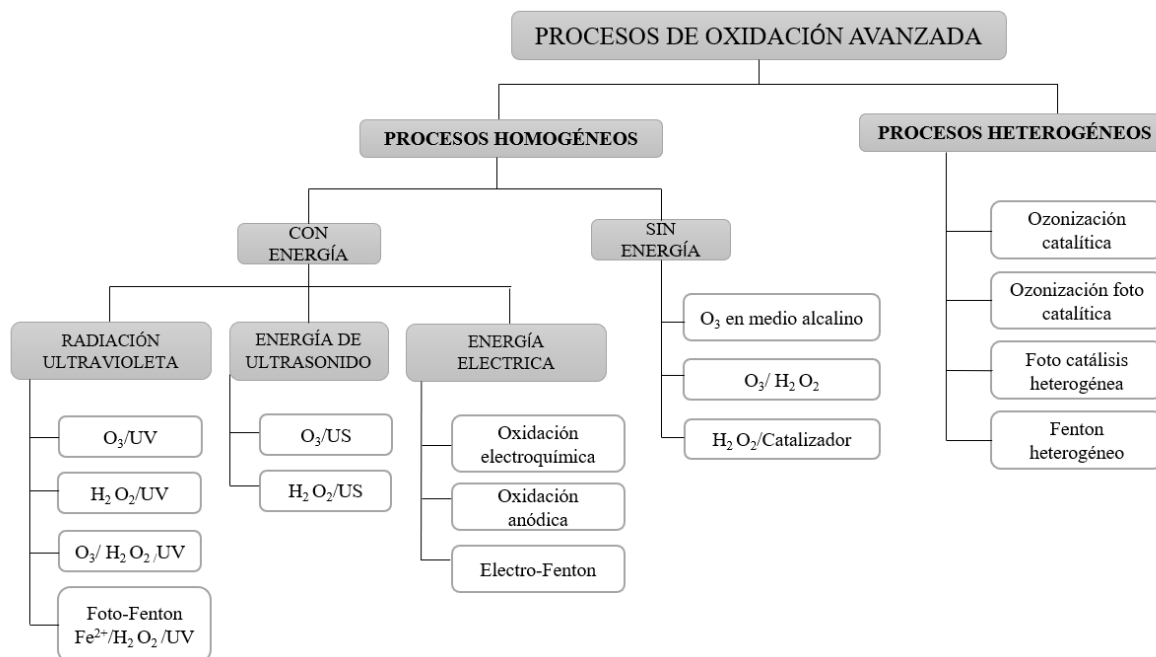


Figura 1. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (Poyatos et al., 2010).

Los procesos de oxidación avanzada se han investigado en los últimos tiempos y se ha logrado establecer algunas de sus ventajas como su capacidad de remover cargas altas de carbono orgánico total y actuar en matrices complejas de distintos contaminantes gracias a su carácter no selectivo. Con este tipo de procesos se obtiene la destrucción de los contaminantes y no un cambio del contaminante a otra fase, así se genera una menor producción de lodos frente a los procesos biológicos. Además, los contaminantes tóxicos se transforman en otros productos menos refractarios que posteriormente puedan ser tratados biológicamente. La mayoría de estos procesos se producen a temperatura ambiente.

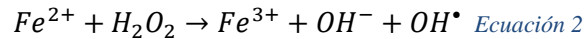
Sin embargo, una de las principales desventajas es el costo asociado a la necesidad energética, así como la presencia de compuestos oxidantes remanentes que generen mayor toxicidad o aumenten los costos de recuperación. (Sanz, Lombraña, & de Luis, 2013)

1.3.1. Fenton

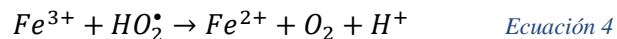
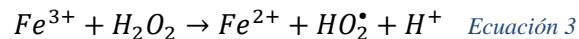
El proceso Fenton se desarrolló por Fenton hace más de 100 años, y reúne las reacciones de peróxido con iones de hierro para formar especies de oxígeno capaces de oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos, Fenton determinó que el peróxido de hidrogeno podía activarse por sales de hierro (II) para oxidar el ácido tartárico (Pignatello, Oliveros, & MacKay, 2006). El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un oxidante fuerte que ha sido empleado en el tratamiento de contaminantes de aguas residuales, como sulfitos, hipocloritos, nitritos, cianuros y cloro. También el peróxido de hidrogeno por disociación con agua puede suplir oxígeno para los microorganismos en sistemas de tratamiento biológico (Neyens & Baeyens, 2003).

Generalizando, el proceso Fenton se reconoce como la producción de radicales hidroxilo en un medio ácido, en una serie de reacciones cíclicas que utilizan iones de hierro férrico y ferroso como catalizador para descomponer el H_2O_2 (Wang & Xu, 2012).

La constante de velocidad para la reacción del ion ferroso con peróxido de hidrógeno es alta, el hierro en condición ferrosa Fe (II) se oxida a férrico Fe (III) en poco tiempo, en presencia de cantidades excesivas de peróxido de hidrógeno (Ecuación 2).

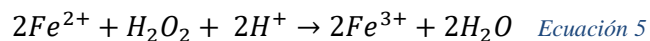


El peróxido de hidrógeno se descompone catalíticamente por el hierro férrico Fe (III) y genera de nuevo radicales (Ecuación 3).



Las reacciones anteriores exponen los estados de oxidación del hierro en ferroso y férrico; como se regenera el Fe(II) y como el H_2O_2 se consume en su totalidad para la producción de radicales hidroxilo.

Una simplificación de la (Ecuación 2) realizada por Walling (1975) sugiere la necesidad de la existencia del ion H^+ (Ecuación 5) para la descomposición del peróxido de hidrogeno, advirtiendo esto sobre la necesidad de un medio ácido para la máxima producción de radicales hidroxilo. Investigaciones previas han demostrado que un pH con valores cercanos a 3 es usualmente el óptimo (Sanz et al., 2013).



A través de las diferentes investigaciones se ha demostrado la capacidad del reactivo Fenton para degradar fenoles, nitrobenceno y herbicidas en el agua, así como para reducir la DQO en aguas residuales municipales. Emplear reactivo Fenton como oxidante en el tratamiento de aguas residuales tiene un gran atractivo debido a que el hierro es un elemento altamente abundante y no tóxico para el medio ambiente, y el peróxido de hidrógeno es de sencilla manipulación y ambientalmente benigno. Por tanto, el proceso de Fenton es muy efectivo para la generación de radicales $\text{OH}\cdot$; sin embargo, implica el consumo de una molécula de Fe(II) para cada radical $\text{OH}\cdot$ producido, exigiendo una alta concentración de Fe(II) (Munter, 2001). El proceso Fenton es eficiente en el intervalo de $\text{pH } 2 - 5$ y generalmente más efectivo a $\text{pH } 2,8 - 3,0$ (Pignatello, 1992).

La reacción del reactivo Fenton se puede generar en sistemas homogéneos, donde el hierro se encuentra en solución o en sistemas heterogéneos donde el catalizador se encuentra en algún complejo sólido (Neyens & Baeyens, 2003). La figura 2 presenta los compuestos de hierro empleados para cada fase,

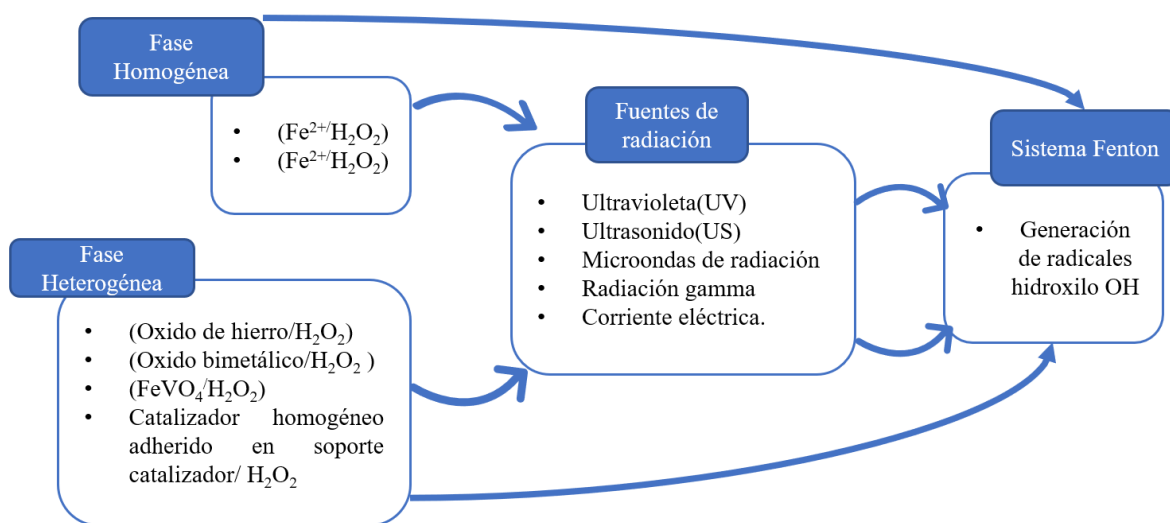
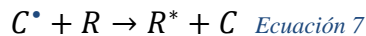


Figura 2. Tipo de procesos Fenton. (Soon & Hameed, 2011)

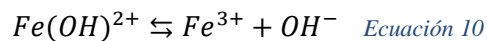
El uso del proceso Fenton Homogéneo tiene algunas desventajas como lo son la producción de lodos de hierro, los costos relativamente altos y el riesgo asociado al almacenamiento y transporte del peróxido de hidrógeno, además de la necesidad de neutralizar el efluente antes de su disposición final. Por ello, frente a estas desventajas se han empleados catalizadores sólidos que contengan hierro para dar lugar a un proceso Fenton Heterogéneo (Wang & Xu, 2012).

1.3.2. Foto – Fenton

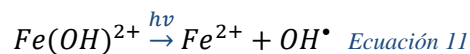
El proceso Foto-Fenton se da con la interacción de una especie que tiene la capacidad de absorber fotones (C) y es activada a través de la luz a un estado de excitación (C^{*}). Al agregar el reactivo (R), este proceso lleva a un estado excitado (R^{*}) que acelera el proceso hasta la obtención de los productos finales (P) (Cáceres, 2002).



El proceso de oxidación en un medio ácido (pH 3) da lugar a la formación del complejo de Fe(OH)²⁺ (Munter, 2001)



Cuando se expone a la radiación UV el complejo es más propenso a la descomposición y formación de radicales hidroxilo y iones de Fe²⁺.



La eficiencia de degradación de este proceso de oxidación es acelerado por la radiación de luz UV, lo que indica no solo la formación de radicales hidroxilos adicionales, sino la mejora en la regeneración del hierro ferroso por la reducción de los complejos férricos como se observa en la Figura 3; logrando no solo la rapidez del proceso sino aumentando la mineralización (Muranaka, Julcour, Wilhelm, Delmas, & Nascimento, 2010).

La fotólisis del peróxido de hidrógeno en la reacción tiene lugar usando luz UV con longitudes de onda $\lambda < 285$ nm, debido a que el H₂O₂ tiene una máxima absorbancia a 210 – 230 nm (Wang & Xu, 2012). Por otro lado, el espectro de absorción de los iones férricos se extiende hasta la región UV/Visible, lo que permite la foto oxidación y mineralización incluso con luz visible. Es importante tener en cuenta que el rendimiento en la formación de Fe(II) es independiente de la longitud de onda de irradiación en el rango de 250 – 450 nm y disminuye con el incremento de la longitud de onda (Munter, 2001).

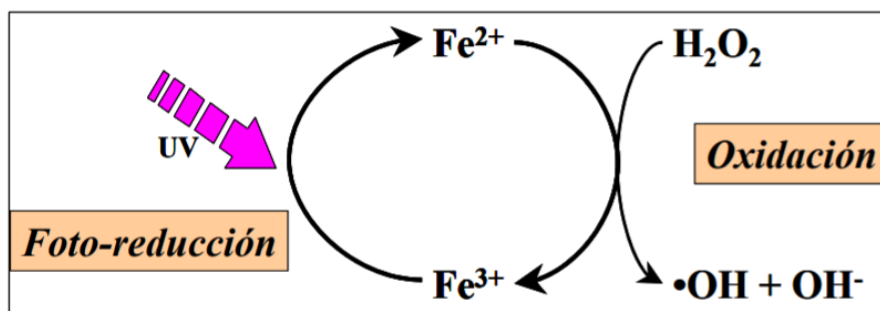


Figura 3. Esquema proceso Foto- Fenton. (Cáceres, 2002)

Las ventajas y desventajas del proceso Foto-Fenton se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso Foto-Fenton. (Rosales Hernandez, 2014)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La irradiación de la luz UV aumenta la degradación, respecto al proceso Fenton. • Los reactivos empleados son de fácil consecución y menor costo frente a otros POA. • Se tiene la posibilidad de disminuir el consumo energético, si se utiliza radiación solar. • Tiene la capacidad de degradar contaminantes de difícil degradación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe desarrollar en un medio ácido con pH cercano a 3, requiriendo un ajuste en el pH del contaminante. • Son requeridas dosis altas de peróxido de hidrógeno. • Producción de lodos con una alta carga de hierro.

1.3.3. Variables de influencia en el proceso Foto-Fenton.

A través de diferentes investigaciones se ha logrado establecer los principales parámetros de control y la influencia e impacto que tienen sobre el proceso de forma individual; a continuación, se describen puntualmente algunas consideraciones.

pH: Uno de los principales factores que interviene en el proceso Foto-Fenton es el pH; un pH ácido favorece la reacción, mejorando la eficiencia del proceso. El potencial de oxidación de los radicales

hidroxilo disminuye con un incremento del pH desde $E_0=2,8$ V a $E_{14}=1,96$ V (Kim and Vogelpohl, 1998). La producción de radicales hidroxilo es mayor en un rango de pH entre 2 – 4, debido a que la regeneración del H_2O_2 también incrementa la tasa de reacción (Sedlak and Andren, 1991), Investigaciones han demostrado que valores de pH iniciales entre 2,5 – 3,5 resultan óptimos para la degradación del residuo (Umar, Aziz, & Yusoff, 2010).

Dosis de hierro: Generalmente un aumento en la dosis de hierro incrementa el porcentaje de remoción de DQO, sin embargo, según Pérez et al. (2002), un exceso de iones de hierro inhibe el proceso de degradación fotoquímica, debido a que este exceso compite con los compuestos orgánicos por los radicales hidroxilo.

Adicionalmente, excesos en la dosis de hierro producen mayor cantidad de lodos y aumento de sólidos disueltos totales y conductividad (Gogate y Pandit, 2004). Esto se refleja en la turbidez marrón que se presenta e inhibe la radiación UV, causando la recombinación de radicales hidroxilo (Umar et al., 2010).

Dosis de peróxido de hidrógeno: Obtener una dosis adecuada de oxidante durante el proceso resulta de gran importancia, teniendo en cuenta que una disminución en la dosis de H_2O_2 no produciría la suficiente cantidad de radicales hidroxilo para lograr la completa degradación, por el contrario un aumento en la dosis de H_2O_2 logra incrementar el porcentaje de degradación (Deng and Englehardt, 2006; Lin and Lo, 1997; Rivas et al., 2001). Sin embargo un exceso de este reactivo produce la flotación de lodos de hierro o la disminución en la sedimentación del lodo debido a la liberación de gases de O_2 en respuesta a la auto descomposición del H_2O_2 (Kim et al., 2001; Lau et al., 2001). Por otra parte, un residual de peróxido de hidrógeno contribuye con DQO en el efluente.

Temperatura: A partir de las diferentes investigaciones se ha encontrado que la temperatura, tiene un efecto positivo en el tratamiento, pero la disminución de los compuestos orgánicos debido a la temperatura es relativamente pequeña comparada con otros factores. Investigaciones demostraron un aumento en la remoción de DQO con el incremento de la temperatura (Umar et al., 2010). A pesar de esto, cuando la temperatura incrementa por encima 40 a 50°C la eficiencia decrece, debido a que se acelera la descomposición del peróxido de hidrogeno en oxígeno y agua. Para dosis de H_2O_2 que superen los 10 a 20 g/L, se debe controlar la temperatura por cuestiones de seguridad (Rosales Hernandez, 2014).

DQO inicial: Estudios han demostrado que, aunque el porcentaje de remoción es alto cuando la DQO inicial es baja, la cantidad de eliminación de DQO es mayor cuando los valores iniciales de DQO son altos. Esto se refleja en un estudio realizado en 2010 donde para una DQO inicial de 743 y 93 mg/L, se obtuvo una remoción de 231 y 57 mg/L respectivamente (Umar et al., 2010).

Tiempo de reacción: El tiempo óptimo para la reacción dependerá básicamente de la dosis de H_2O_2 , el punto para el cual se consume la totalidad de oxidante en la reacción se denomina como el tiempo final (Lin y Chang, 2000). En la mayoría de las investigaciones se han empleado tiempos típicos entre 60 y 300 minutos, encontrándose un óptimo alrededor de las 2 horas. No obstante, según el tipo de residuo y de carga contaminante estos tiempos pueden variar.

1.3.4. Casos de estudio

El tratamiento Foto-Fenton, con radiación solar, para un efluente de la industria textil, indicó como condiciones óptimas 20 mg/L de Fe^{2+} y 500 mg/L de H_2O_2 a pH de 2,8 (Starling et al., 2017), para un 96% de remoción en el Carbón Orgánico Disuelto y 99% de remoción de absorbancia. Se detectaron picos de toxicidad durante el tratamiento que pudieron ser formados durante la reacción, que finalmente fueron eliminados por la radiación. Se realizaron múltiples ensayos con diferentes muestras de agua residual de la industria textil y se obtuvo un porcentaje promedio de remoción cercano al 90%. Finalmente se evaluó la aptitud de reuso del efluente tratado y se determinó como exitosa, encontrando así en el tratamiento Foto-Fenton una alternativa de tratamiento para este tipo de residuos.

Se evaluó la eficiencia del proceso Foto-Fenton en un agua residual de la industria cosmética, que se caracteriza por una alta carga orgánica y un bajo índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO), implicando dificultad para ser tratada por procesos biológicos. Se estableció que los parámetros que afectaban la oxidación química eran el pH, la dosis de peróxido de hidrogeno H_2O_2 , la dosis de sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), la concentración inicial del contaminante y el tiempo; para estos parámetros de control se encontró como condiciones óptimas pH 3; 1 ml/L de H_2O_2 y 0,75 g/L de Fe(II) y Fe(III) para un tiempo de reacción de 40 minutos; logrando un 95% de remoción en la Demanda Química de Oxígeno -DQO (Ebrahiem, Al-Maghrabi, & Mobarki, 2013).

La aplicación de un proceso Foto-Fenton heterogéneo para el vertimiento de la industria curtiembre, obtuvo un 96% de remoción de DQO; con un pH óptimo de 7, una dosis de hierro de 0,5 g/L, 1,8 g/L de H_2O_2 y un tiempo de radiación de 4 horas, en un área de 0,06 m², con un costo de tratamiento de

\$21.34 dólares por metro cúbico (Selvabharathi et al., 2015). Durante la investigación se encontró una baja eficiencia en el tratamiento para dosis bajas de Fe(II), indicando un número insuficiente de iones de hierro para la producción de los radicales hidroxilo; lo cual se evidencio en el incremento en la eficiencia de tratamiento para mayores dosis de Fe(II), porque al aumentar el hierro se aumentaba el efecto catalítico del peróxido de hidrogeno. Otra de las aplicaciones para este tipo de procesos fue desarrollada por Tony & Bedri (2014) en el tratamiento del efluente de un lavadero de carros; en este trabajo emplearon un único tiempo de radiación de 1 hora con una longitud de onda de 254 nm y encontraron una relación molar óptima para H₂O₂: Fe⁺² de 12:1 con un pH de 3,5, con lo cual se obtuvo un 91,7% en la remoción de DQO.

También se implementaron procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de lixiviados, con 5g/L de peróxido de hidrógeno y una relación óptima de 8:1 para H₂O₂: Fe⁺²/Fe⁺³, a un pH de 3, para una remoción del 83,2% de la DQO con un tiempo de radiación de 120 minutos (Zazouli, Yousefi, Eslami, & Bagheri Ardebilian, 2012). Esta investigación se realizó en simultáneo para procesos Fenton, Fenton modificado y Foto-Fenton. Al final se obtuvo una mayor relación DBO₅/DQO para el proceso Foto-Fenton con valores de 0,035, 0,028 y 0,173 respectivamente. También encontraron que la cantidad de hierro añadida como catalizador generaba un aumento en la concentración de hierro, tanto en el lodo generado, como en el agua tratada para los procesos Fenton y Fenton modificado, mientras que en el Foto-Fenton se presenta una reducción en la cantidad de lodo generado asociado a la radiación UV.

Finalmente, una de las aplicaciones más estudiadas para los procesos de oxidación avanzada tipo Foto-Fenton es la degradación de fenoles y compuestos aromáticos (Gar Alalm, Tawfik, & Ookawara, 2014) . En el estudio se evaluó el efecto del tiempo de radiación, de la concentración inicial del contaminante, del pH inicial y de la dosis del reactivo Fenton. Se logró una completa degradación del fenol a los 45 minutos de irradiación con una concentración de 100 mg/L; la eficiencia de degradación del fenol disminuyó con el aumento de la concentración inicial del contaminante. Compuestos aromáticos (Catecol, benzoquinona e hidroquinona) aumentaron en los primeros 20 minutos de reacción y disminuyeron con la oxidación y producción de radicales hidroxilo. La eficiencia de degradación mejoró en condiciones ácidas, pH 3,1, incrementando las dosis de reactivos llegando a una dosis óptima de 44 mmol/L de H₂O₂ y 0,5 g/L FeSO₄·7H₂O. Adicionalmente se evaluó la opción económicamente óptima usando 30 mmol/L de H₂O₂ y 0,5 g/L FeSO₄·7H₂O por un tiempo de irradiación de 60 minutos, con un costo total de 2,54 euros por metro cúbico.

1.4. Marco normativo reúso

La Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, en el año 2016, mediante el documento “Uso seguro del agua para reúso”, identificó el marco normativo en América, el cual se presenta en la Tabla 3.

En Colombia la Resolución 1207 de 2014, adopta disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. En el artículo 6, numeral 2 establece que el agua residual tratada podrá ser utilizada en la industria en actividades de:

1. Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
2. Descarga de aparatos sanitarios.
3. Limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de material particulado.
4. Sistemas de redes contra incendio.

El artículo 7, ***Criterios de calidad***, establece los valores límites para parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, químicos, biocidas, iones, metales, metaloides, no metales y otros, que deberán cumplir los numerales descritos anteriormente.

Tabla 3. Normatividad vigente de los países e instituciones en América. (Tello, 2016)

País	Nombre	Título	Fecha
OMS	Guías OMS	Para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises.	2006
Estados Unidos	EPA 430/09-91-022	Municipal wastewater reuse selected readings on water reuse	1991
	EPA/600/R-12/618	Guidelines for water reuse	2012
Chile	Norma Chilena Oficial 1333	Requisitos de calidad del agua para diferentes usos	1987
México	NOM-003-SEMARNAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público	1998
Brasil	Asociación Brasileña de Normas Técnicas - NBR - 13.969 / 97	La reutilización de aguas residuales	1997
Colombia	Resolución 1207	Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.	2014
Costa Rica	Decreto N° 33601	Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales	2009

2. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta la metodología experimental descrita en la Figura 4.

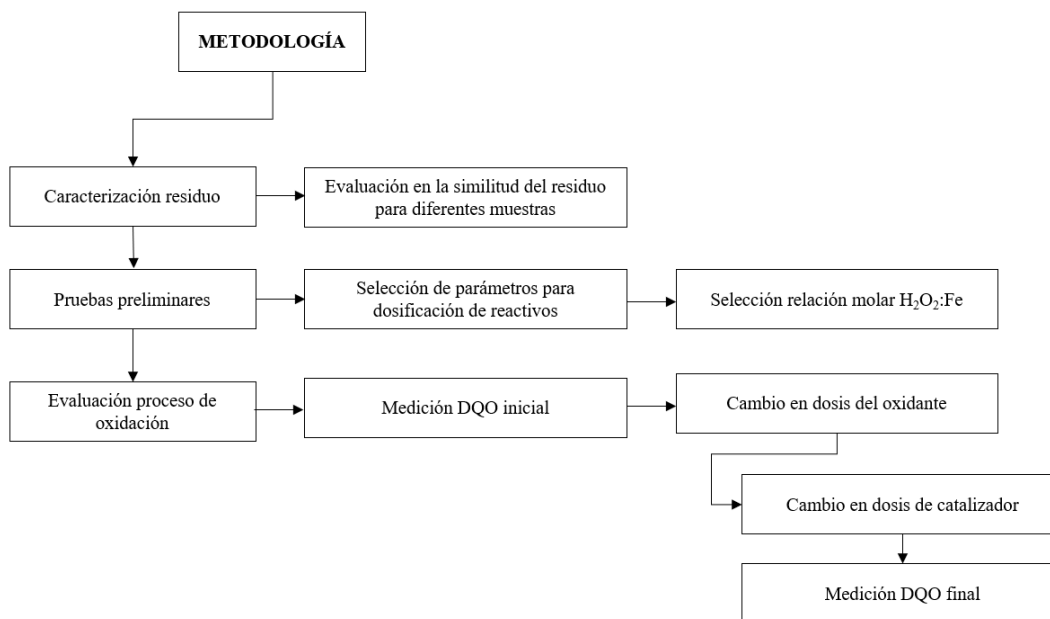


Figura 4. Diagrama metodología experimental

2.1. Muestra y caracterización.

La muestra analizada proviene del vertimiento de la planta de producción de bebidas del Grupo Gloria Colombia, ubicado en el municipio de Simijaca. Para determinar las características de este efluente se realizan tres muestreos compuestos, durante 8 horas, entre los días 13 al 15 de marzo de 2018, donde se tomaron las submuestras cada hora y se realizó la composición final de acuerdo con el caudal. Para la caracterización de las muestras se emplearon los métodos descritos en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y métodos analíticos.

PARÁMETRO	TÉCNICA	MÉTODO ANALÍTICO
<i>Alcalinidad</i>	Titulación	SM 2320 B
<i>pH</i>	Electrométrico	SM 4500-H ⁺ B
<i>Color</i>	Espectrofotométrico	ISO 7887 2012 - 04 (B)
<i>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)</i>	Titulación	SM 5210 B
<i>Demanda Química de Oxígeno</i>	Titulación	SM 5220 C
<i>Dureza total</i>	Titulación	SM 2340 C
<i>Dureza Cálctica</i>	Titulación	SM 3500-Ca B
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	Nesslerización directa	SM 417 B 16a edición
<i>Nitritos</i>	Colorimetría	SM 4500- NO ₂ ⁻ B
<i>Sólidos Sedimentables</i>	Volumétrico - Cono Imhoff	SM 2540 F
<i>Sólidos Suspendidos Totales</i>	Gravimétrico	SM 2540 D
<i>Cloruros</i>	Titulación	SM 4500-Cl ⁻ B
<i>Sulfatos</i>	Turbidimétrico	SM 4500-SO ₄ ⁼ E

Los resultados de la caracterización se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización del vertimiento industrial.

PARÁMETRO		UNIDAD	13/03/2018	14/03/2018	15/03/2018
			Valor	Valor	Valor
<i>Alcalinidad</i>		mg/L - CaCO ₃	274	340	290
<i>pH</i>		Unidades	10	11	10
<i>Color</i>	<i>436 nm</i>	Abs/m	60	52	35
	<i>525nm</i>	Abs/m	52	51	29
	<i>620 nm</i>	Abs/m	46	48	26
<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)</i>		mg/L-O ₂	1960	728	564
<i>Demanda Química de Oxígeno</i>		mg/L-O ₂	4028	2238	895
<i>Dureza total</i>		mg/L - CaCO ₃	192	456	152
<i>Dureza Cálcica</i>		mg/L - CaCO ₃	144	368	120
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>		mg/L - N	6	3	2
<i>Nitritos</i>		mg/L- N	0	0	0
<i>Sólidos Sedimentables</i>		mL/L	10	59	3
<i>Sólidos Suspendedos Totales</i>		mg/L	487	653	227
<i>Cloruros</i>		mg/L	273	1583	333
<i>Sulfatos</i>		mg/L	20	34	24

2.2. Condiciones de ensayo y materiales

Para la dosificación inicial de peróxido de hidrógeno se seleccionó una relación H₂O₂:DQO de 3:1, a partir investigaciones realizadas para el tratamiento de aguas residuales industriales por medio del proceso foto – fenton (Rosales Hernandez, 2014) (Zapata,2010).

Como se evidencio en los resultados de caracterización presentados en la tabla 5, el vertimiento generado por la planta de bebidas no cuenta con las mismas características físico químicas para los diferentes días de muestreo a pesar de provenir del mismo proceso productivo, presentando una significativa diferencia en el valor de la DQO, impidiendo esta condición la estandarización de la evaluación a una única muestra.

Por tal motivo teniendo en cuenta que la dosis de oxidante es función de la DQO inicial, se definió realizar la evaluación del proceso de oxidación con cuatro muestras puntuales tomadas los días 30 de octubre, 08, 16 y 22 de noviembre, sobre las cuales se realizó el proceso descrito a continuación.

Se varió la dosis del oxidante y se mantuvo la dosis de catalizador conservando siempre relaciones molares de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{++}$ de 9;13; 22 y 31. Los tiempos de irradiación aplicados son de 1, 2.5 y 5 horas.

Los ensayos se realizaron por cochada, en un reactor de vidrio, con 4 litros de muestra, que se mantuvo en agitación constante usando barras magnéticas (Figura 5).

El proceso de oxidación incluye los siguientes pasos:

1. Determinación de la DQO inicial de la muestra.
2. Ajuste a pH 3 con ácido sulfúrico (H_2SO_4 1N), según la necesidad.
3. Adición de la dosis de catalizador, sulfato de hierro sólido ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hasta completa disolución.
4. Adición de la dosis de peróxido de hidrógeno (H_2O_2 30%).
5. Una vez añadido el peróxido de hidrógeno se enciende la lámpara de luz UV (254 nm) de 15 W; aplicando la luz UV hasta las 5 horas.
6. Para los tiempos de irradiación definidos inicialmente 1, 2,5 y 5 horas, se toma una muestra para realizar el análisis de DQO, por duplicado.

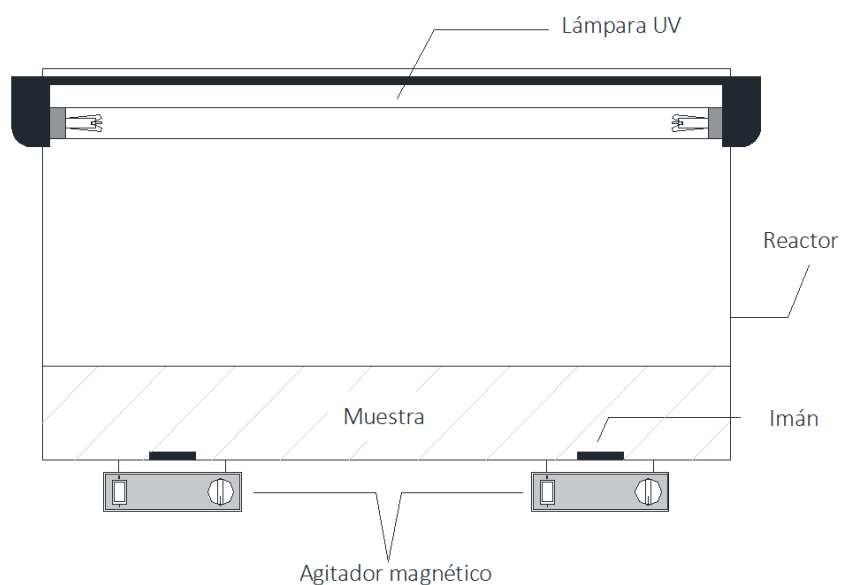


Figura 5. Montaje experimental proceso de oxidación.

3. Resultados

El registro de los resultados de Demanda Química de Oxígeno - DQO para cada muestra se presentan en el Anexo Datos mediciones DQO

3.1. Demanda Química de Oxígeno

En la Figura 6 se presentan los resultados de remoción de DQO para la muestra 1. Se logró un porcentaje máximo de remoción de DQO del 80% , con una dosis de peróxido de hidrógeno de 12,5 g/L, 0,67 g/L de hierro y tiempo de radiación de 150 minutos.

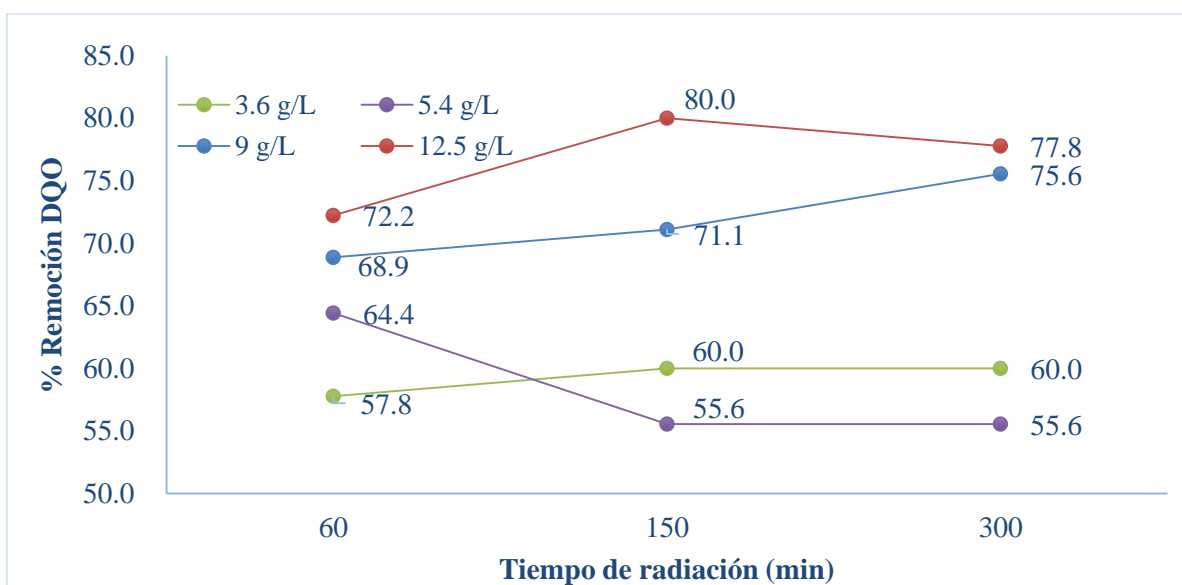


Figura 6. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H_2O_2 y 0,67 g/L de Fe^{++} - Muestra 1.

En la Figura 7 se muestran los resultados de remoción de DQO para la muestra 2. Se logró un porcentaje máximo de remoción de DQO del 78,9%, con una dosis de peróxido de hidrogeno de 9 g/L, 0,67 g/L de hierro y tiempo de radiación de 300 minutos.

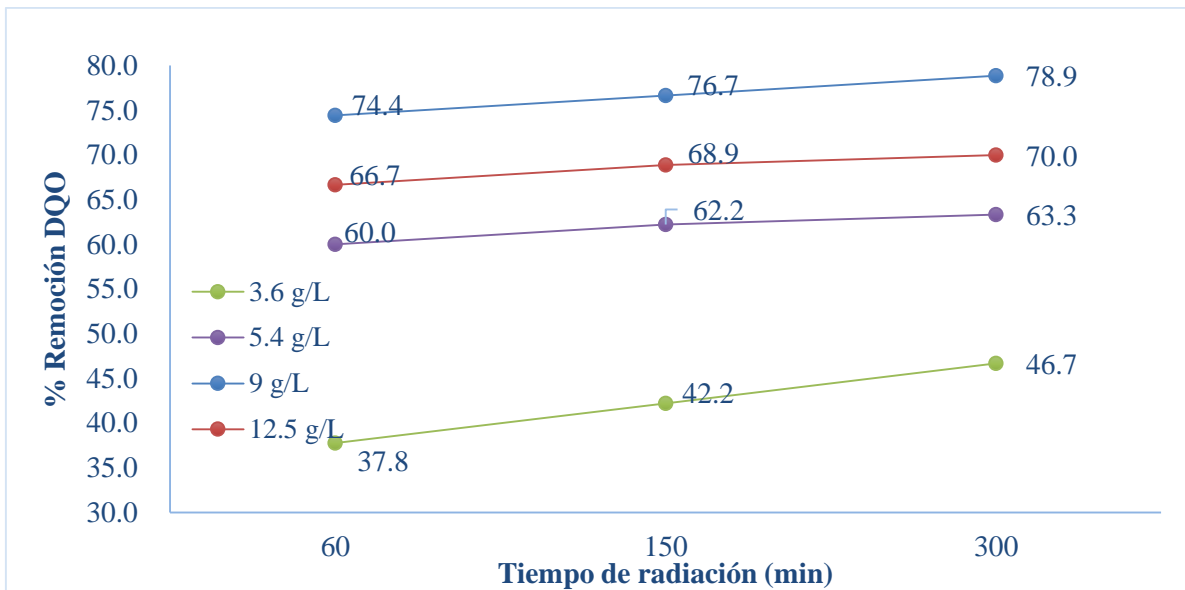


Figura 7. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H_2O_2 y 0,67 g/L de Fe^{++} - Muestra 2.

En la Figura 8 se presentan los resultados de remoción de DQO para la muestra 3. Se logró un porcentaje máximo de remoción de DQO del 71,5% , con una dosis de peróxido de hidrógeno de 15,6 g/L, 0,83 g/L de hierro y tiempo de radiación de 300 minutos.

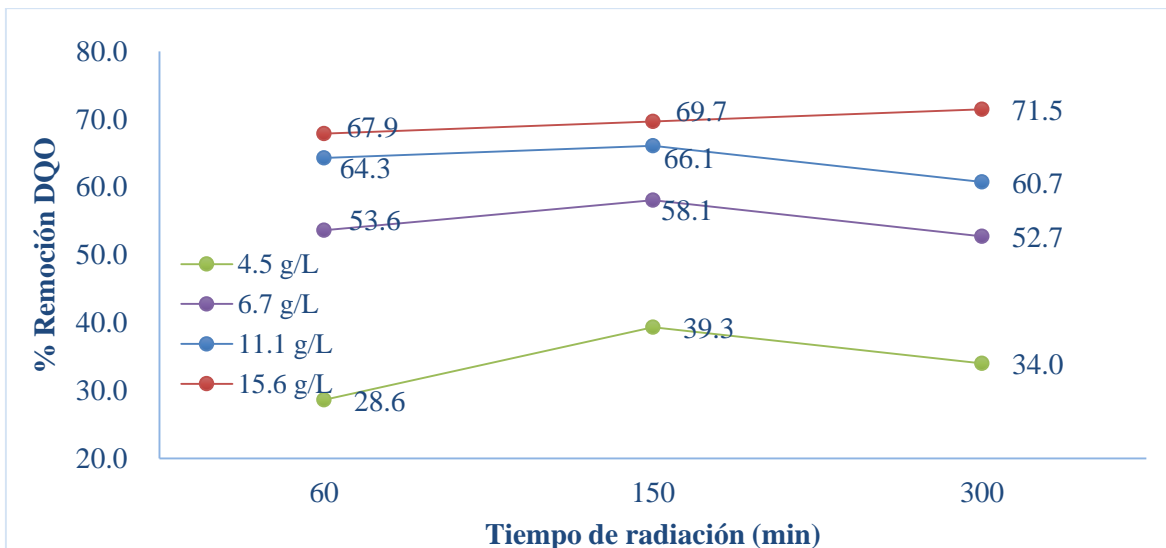


Figura 8. Porcentaje de remoción de DQO para diferentes dosis de H_2O_2 y 0,83 g/L de Fe^{++} - Muestra 3.

Los resultados observados en las figuras 6 a la 8 indican que para la mayoría de los casos se obtiene una mejor remoción de DQO a mayor dosis de peróxido de hidrógeno y mayor tiempo de radiación.

Para evaluar la influencia de la relación molar en el proceso, se determinaron los porcentajes de remoción para relaciones molares de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{++}$ de 9,13, 22 y 31 para los mismos tiempos de radiación de 1; 2,5 y 5 horas.

Los porcentajes de remoción de DQO se presentan en las figuras 9, 10 y 11.

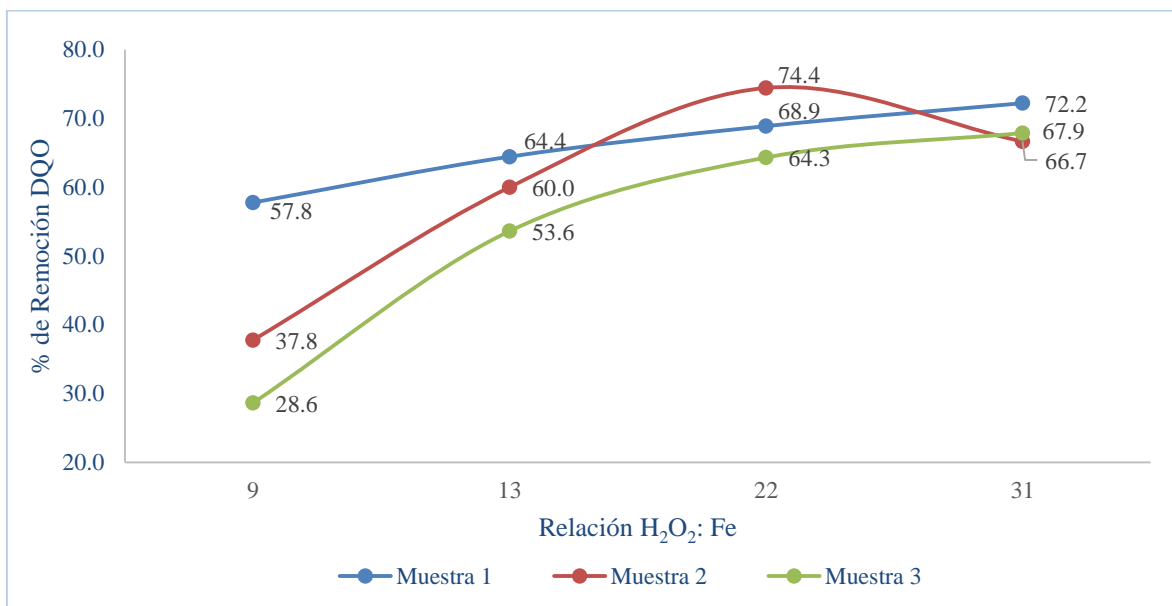


Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO, para 60 min de irradiación y diferentes relaciones $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}$

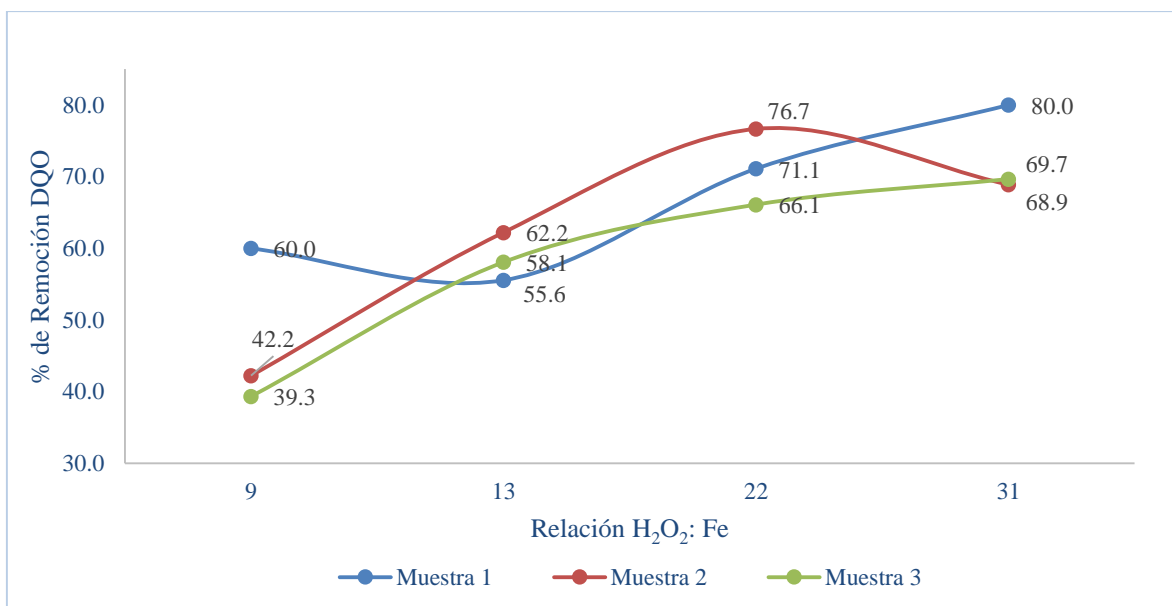


Figura 10. Porcentaje de remoción de DQO, para 150 min de irradiación y diferentes relaciones $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}$

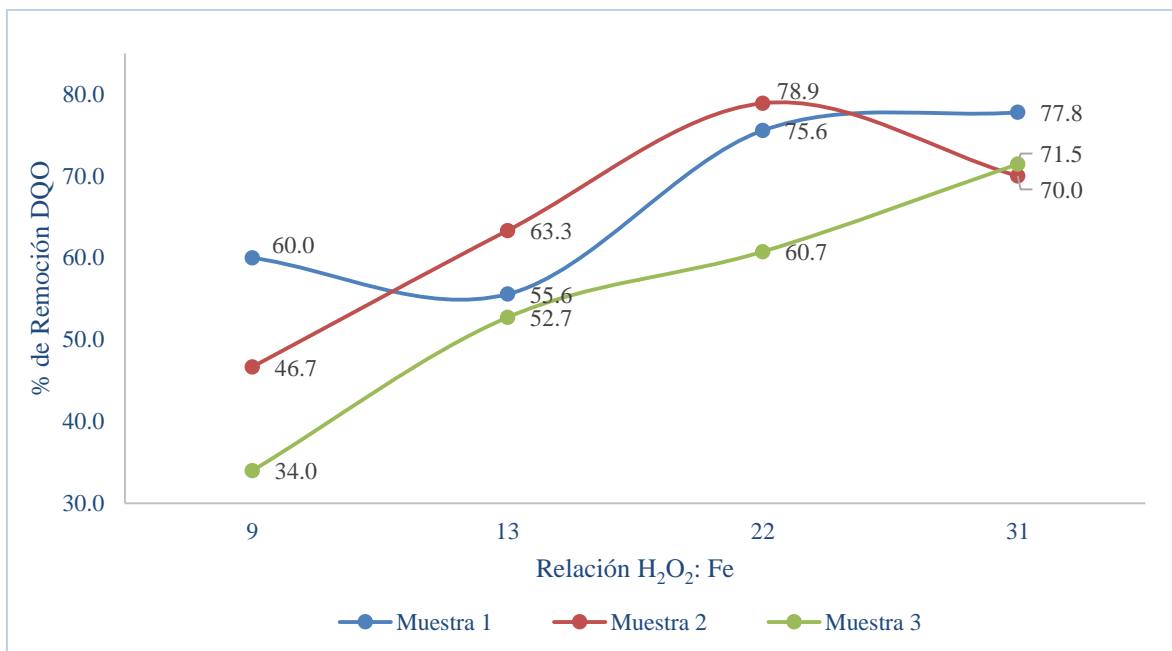


Figura 11. Porcentaje de remoción de DQO, para 300 min de irradiación y diferentes relaciones H₂O₂:Fe

Como se puede observar en las figuras 9 a 11, en general se logra una mayor remoción de DQO con una relación mayor de H₂O₂:Fe⁺⁺; aunque para la muestra 2 la mayor remoción de obtiene para una relación molar H₂O₂:Fe⁺⁺ de 22.

Para evaluar la influencia de la dosis aplicada de H₂O₂ y de Fe⁺⁺ sobre la remoción de DQO; se aplicó, a la muestra 4, la misma relación H₂O₂:Fe⁺⁺ de 22:1 con cuatro dosis diferentes de hierro y peróxido de hidrógeno. La dosificación se aumentó en múltiplos de 2, como se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Dosis Muestra 4

Dosificación	X	2X	4X	6X
H ₂ O ₂ (g/L)	7,95	15,9	31,8	47,7
Fe (g/L)	0,60	1,19	2,38	3,57
Relación H ₂ O ₂ : Fe	22	22	22	22

Como se observa en las figuras 12 y 13 el mayor porcentaje de remoción de DQO se obtiene con la mayor concentración de oxidante y catalizador, y un tiempo óptimo de radiación de dos horas y media.

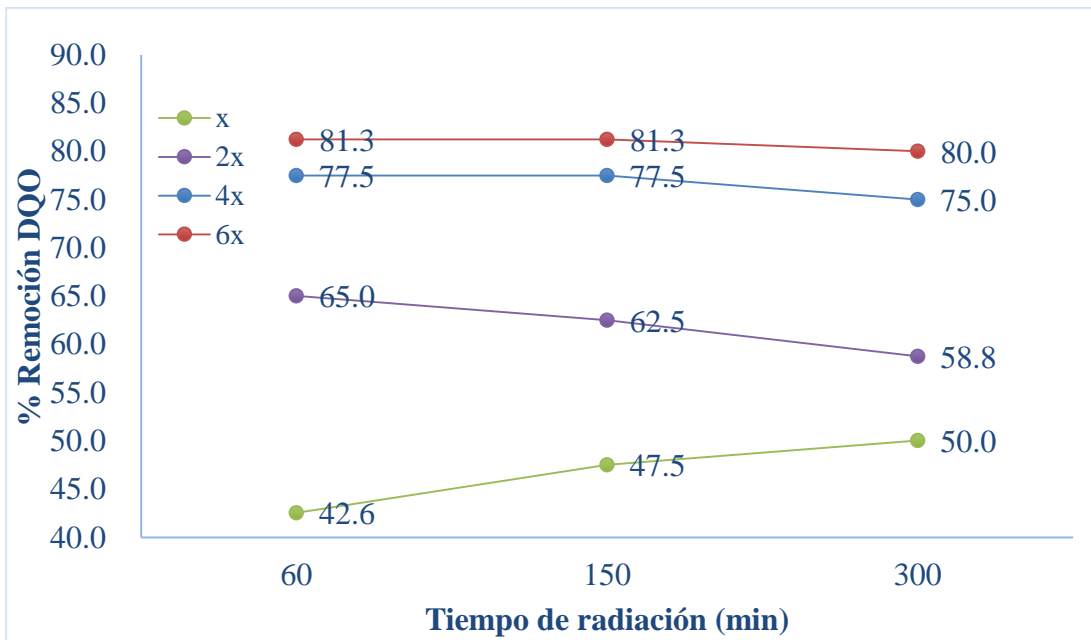


Figura 12. Porcentajes de remoción de DQO para la relación molar 22:1

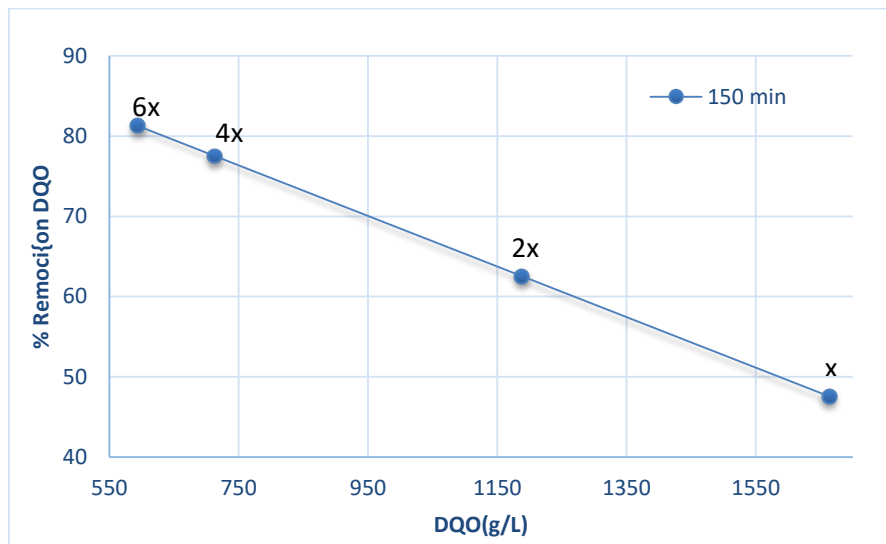


Figura 13. Porcentaje de remoción de DQO para 4 dosis diferentes y 150 min de radiación.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que con el aumento de la dosificación se observa un considerable aumento en el color, como se puede apreciar en la Figura 17. Esto acorde a lo definido en las variables de influencia del proceso, donde incrementos en la dosis de oxidante y catalizador producen flotación de los lodos de hierro, aumento de sólidos disueltos y de la turbidez, afectando esto el color de la muestra.

4. Conclusiones y recomendaciones

- Se logró establecer a partir del proceso de tratamiento realizado sobre el vertimiento de la planta de bebidas del Grupo Gloria en Simijaca, que a mayor concentración de oxidante y catalizador, mayor porcentaje de remoción de DQO.
- Se encontró que la relación molar óptima de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{++}$ es de 31:1.
- Se obtuvo un porcentaje promedio de remoción de DQO de 71.6% para la relación molar óptima, en el proceso foto-fenton evaluado
- Para los tres tiempos de radiación evaluados, se encuentra un periodo óptimo en la degradación del contaminante de dos horas y media.
- Se debe neutralizar el residuo del proceso antes de ser vertido.
- Se recomienda realizar la evaluación del proceso Foto-Fenton con base en análisis químico completo del agua tratada para establecer su eficiencia en términos de características diferentes a la Demanda Química de Oxígeno- DQO.
- Se recomienda establecer valores límites para la dosificación de reactivos, de tal forma que no se incurra en el deterioro de otros parámetros físico – químicos de la muestra como color, turbiedad, conductividad.
- Se recomienda evaluar la intensidad de la radiación, para establecer su influencia sobre la eficiencia del proceso de tratamiento.

5. Bibliografía

- Cáceres, (2002). Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar. Tesis doctoral. Universidad de Almería. España.
- Deng, Y., Englehardt, J.D., (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Res.* 40, 3683–3694.
- Ebrahiem, E. E., Al-Maghrabi, M. N., & Mobarki, A. R. (2013). Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1674–S1679. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.06.012>
- Gar Alalm, M., Tawfik, A., & Ookawara, S. (2014). Investigation of optimum conditions and costs estimation for degradation of phenol by solar photo-Fenton process. *Applied Water Science*, 7(1), 375–382. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0252-0>
- Gogate, P., Pandit, A., (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment II. Hybrid methods. *Adv. Environ. Res.* 8, 553–597.
- Kim, J.S., Kim, H.Y., Won, C.H., Kim, J.G., (2001). Treatment of landfill produced in stabilized landfills by coagulation and Fenton oxidation process. *J. Chin. Inst. Chem. Eng.* 32, 425–429.
- Kim, S., Vogelpohl, A., (1998). Degradation of organic pollutants by the photo-Fenton process. *Chem. Eng. Technol.* 21, 187–191.
- Lin, S.H., Chang, C.C., (2000). Treatment of landfill leachate by combined electro-Fenton oxidation and sequencing batch reactor method. *Water Res.* 34, 4243–4249.
- Martínez Ávila, Oscar Mauricio (2012) Evaluación de un proceso integrado de adsorción y oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales industriales reales. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Munter, R. (2001). Advanced Oxidation Processes – Current. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, 50(2), 59–80. <https://doi.org/10.1002/9780470561331.ch18>
- Muranaka, C. T., Julcour, C., Wilhelm, A. M., Delmas, H., & Nascimento, C. A. O. (2010). Regeneration of activated carbon by (Photo)-Fenton oxidation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(3), 989–995. <https://doi.org/10.1021/ie900675d>

- Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1–3), 33–50. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00282-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00282-0)
- Perez, M., Torrades, F., Domenech, X., Peral, J., (2002). Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents. *Water Res.* 36, 2703–2710.
- Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1–84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- Poyatos, J. M., Muñio, M. M., Almecija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E., & Osorio, F. (2010). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205(1–4), 187–204. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1>
- Ray M.B., Chen J.P., Wang L.K., Pehkonen S.O. (2006) Advanced Oxidation Processes. In: Wang L.K., Hung Y.T., Shammas N.K. (eds) Advanced Physicochemical Treatment Processes. Handbook of Environmental Engineering, vol 4. Humana Press
- Resolución 1207 de 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. 25 de julio de 2014.
- Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. 17 de marzo de 2015.
- Romero Jairo. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principio de diseño. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 3ra edición.
- Rosales Hernandez, A. G. (2014). Procesos De Oxidacion Avanzada Tipo Fenton Con Y Sin Luz Solar Para El Tratamiento De Lixiviados Pretratados De Rellenos Sanitarios. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 1–107.
- Sanz, J., Lombraña, J. I., & de Luis, A. (2013). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias. *Afinidad: Revista de Química Teórica y*

Aplicada, 70(561), 24–33.

Sedlak, D.L., Andren, A.W., (1991). Oxidation of chlorobenzene with Fenton's reagent. *Environ. Sci. Technol.* 25, 777–782.

Selvabharathi, G., Adishkumar, S., Jenefa, S., Ginni, G., Rajesh Banu, J., & Tae Yeom, I. (2015). Combined homogeneous and heterogeneous advanced oxidation process for the treatment of tannery wastewaters. *Journal of Water Reuse and Desalination*, jwrd2015139. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.139>

Soon, A. N., & Hameed, B. H. (2011). Heterogeneous catalytic treatment of synthetic dyes in aqueous media using Fenton and photo-assisted Fenton process. *Desalination*, 269(1–3), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.002>

Starling, M. C. V. M., dos Santos, P. H. R., de Souza, F. A. R., Oliveira, S. C., Leão, M. M. D., & Amorim, C. C. (2017). Application of solar photo-Fenton toward toxicity removal and textile wastewater reuse. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14), 12515–12528. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7395-5>

Tello E. Pilar, Mijailova Petia, Chamy Rolando. (2016) Uso seguro del agua para el reúso. *AIDIS*, 257-267. http://www.aidis.org.br/PDF/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf

Tony, M. a., & Bedri, Z. (2014). Experimental Design of Photo-Fenton Reactions for the Treatment of Car Wash Wastewater Effluents by Response Surface Methodological Analysis. *Advances in Environmental Chemistry*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/958134>

Umar, M., Aziz, H. A., & Yusoff, M. S. (2010). Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste Management*, 30(11), 2113–2121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.003>

Vargas Solla, Mónica Andrea (2016) Oxidación Fotocatalítica de Derrames de Aceite en Agua con TiO₂/UV. Maestría tesis, Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.

Walling, C., (1975) Fenton's reagent revisited, *Accounts of Chemical Research*, 8(4), 125-131

Wang, J. L., & Xu, L. J. (2012). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Formation of hydroxyl radical and application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*,

42(3), 251–325. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>

Zapata A., Oller I., Rizzo L., Hilgert S., Maldonado M.I., Sanchez-Perez J.A., Malato S.(2010) 'Evaluation of operating parameters involved in solar photo-Fenton treatment of wastewater: Interdependence of initial pollutant concentration, temperature and iron concentration', *Appl.Catal. B*, 97, pp.292-298,

Zazouli, M. A., Yousefi, Z., Eslami, A., & Bagheri Ardebilian, M. (2012). Municipal solid waste landfill leachate treatment by Fenton, photo-Fenton and Fenton-like processes: Effect of some variables. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9(3). <https://doi.org/10.1186/1735-2746-9-3>

Anexos

a. Registro fotográfico

Se presenta el registro fotográfico del efluente obtenido para las cuatro dosis ensayadas en el tratamiento de la muestra 4, la numeración de los vasos de precipitado 1, 2 y 3, corresponden a los tiempos de radiación de 1; 2,5 y 5 horas respectivamente.



Figura 14. Muestra 4 – Dosis 1: 7,95 g/L de H_2O_2 y 0,60 g/L – Fe^{++} (23/11/2018)



Figura 15. Muestra 4 – Dosis 2: 15,9 g/L de H_2O_2 y 1,19 g/L – Fe^{++} (26/11/2018)



Figura 16. Muestra 4 – Dosis 3: 31,8 g/L de H_2O_2 y 2,38 g/L – Fe^{++} (27/11/2018)



Figura 17. Muestra 4 – Dosis 4: 47,7 g/L de H_2O_2 y 3,57 g/L – Fe^{++} (28/11/2018)

b. Datos mediciones DQO

En las Tablas 8 a 11 se incluyen los resultados de las determinaciones de DQO ejecutadas en laboratorio.

Tabla 7. Control Muestra 1.

CONTROL DE ENSAYOS FOTO - FENTON						
MUESTRA 1						
Fecha	30/10/2018		pH muestra = 9.12			
DQO inicial(mg/L)	1980	1584				
Muestra (mL)	1,00	1,50				
FAS Muestra(mL)	1,20	1,15				
FAS Testigo(mL)	1,45	1,45				
Normalidad	0,09900990					
DQO calculo(mg/L)	1782					
ENSAYOS						
DOSIS 1						
Fecha	31/10/2018		H₂O₂ (g/L)	3,6	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	35		Relación Molar H₂O₂: Fe		9	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	634	634	792	792	950	792
Muestra (mL)	2,50		2,50		2,50	
FAS Muestra(mL)	1,30	1,30	1,25	1,25	1,20	1,25
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	64,44	64,44	55,55	55,55	46,66	55,55
DOSIS 2						
Fecha	01/11/2018		H₂O₂ (g/L)	5,4	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	27,5		Relación Molar H₂O₂: Fe		13	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	554	515	554	515	436	436
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,80	0,85	0,80	0,85	0,95	0,95
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	68,89	71,11	68,89	71,11	75,55	75,55
DOSIS 3						
Fecha	06/11/2018		H₂O₂ (g/L)	9	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	28		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	554	436	356	356	396	396
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,75	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
FAS Testigo(mL)	1,45	1,45	1,45	1,45	1,50	1,50
% Remoción	68,89	75,55	80,00	80,00	77,78	77,78
DOSIS 4						
Fecha	07/11/2018		H₂O₂ (g/L)	12,5	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	45		Relación Molar H₂O₂: Fe		31	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	752	713	713	673	713	713
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,55	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	57,77	60,00	60,00	62,22	60,00	60,00

Tabla 8. Control Muestra 2.

CONTROL DE ENSAYOS FOTO - FENTON						
MUESTRA 2						
Fecha	08/11/2018		pH muestra =12.1			
DQO_{inicial}(mg/L)	2112	1782				
Muestra (mL)	1,50	2,00				
FAS Muestra(mL)	1,10	1,05				
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50				
Normalidad	0,09900990					
DQO_{calculo}(mg/L)	1782					
ENSAYOS						
DOSIS 1						
Fecha	09/11/2018		H₂O₂ (g/L)	3,6	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	32		Relación Molar H₂O₂: Fe		9	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO_{final}(mg/L)	1109	1109	950	1109	950	950
Muestra (mL)	2,50		2,50		2,50	
FAS Muestra(mL)	1,15	1,15	1,20	1,15	1,15	1,15
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,45	1,45
% Remoción	37,77	37,77	46,66	37,77	46,66	46,66
DOSIS 2						
Fecha	13/11/2018		H₂O₂ (g/L)	5,4	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	35		Relación H₂O₂: Fe		13	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO_{final}(mg/L)	950	713	673	673	673	634
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,30	0,60	0,65	0,65	0,65	0,70
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	46,66	60,00	62,22	62,22	62,22	64,44
DOSIS 3						
Fecha	15/11/2018		H₂O₂ (g/L)	9	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	35		Relación H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO_{final}(mg/L)	436	475	436	396	356	396
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,95	0,95	0,95	1,05	1,05	1,00
FAS Testigo(mL)	1,50	1,55	1,50	1,55	1,50	1,50
% Remoción	75,55	73,33	75,55	77,78	80,00	77,78
DOSIS 4						
Fecha	16/11/2018		H₂O₂ (g/L)	12,5	Fe (g/L)	0,67
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	35		Relación H₂O₂: Fe		31	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO_{final}(mg/L)	594	594	554	554	554	515
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,75	0,75	0,80	0,80	0,75	0,80
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,45	1,45
% Remoción	66,66	66,66	68,89	68,89	68,89	71,11

Tabla 9. Control Muestra 3.

CONTROL DE ENSAYOS FOTO - FENTON						
MUESTRA 3						
Fecha	16/11/2018		pH muestra = 9.7			
DQO inicial(mg/L)	2220	2220				
Muestra (mL)	2,50	2,50				
FAS Muestra(mL)	0,80	0,80				
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50				
Normalidad	0,09909900					
DQO calculo(mg/L)	2220					
ENSAYOS						
DOSIS 1						
Fecha	19/11/2018		H₂O₂ (g/L)	4,5	Fe (g/L)	0,83
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	50		Relación Molar H₂O₂: Fe		9	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	1426	1743	1347	1347	1505	1426
Muestra (mL)	0,50		0,50		0,50	
FAS Muestra(mL)	0,55	0,35	0,60	0,60	0,55	0,60
FAS Testigo(mL)	1,45	1,45	1,45	1,45	1,50	1,50
% Remoción	35,78	21,51	39,35	39,35	32,21	35,78
DOSIS 2						
Fecha	20/11/2018		H₂O₂ (g/L)	6,7	Fe (g/L)	0,83
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	47		Relación Molar H₂O₂: Fe		13	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	1030	1030	950	911	1069	1030
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,20	0,20	0,30	0,35	0,15	0,20
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	53,62	53,62	57,18	58,97	51,83	53,62
DOSIS 3						
Fecha	21/11/2018		H₂O₂ (g/L)	11,1	Fe (g/L)	0,83
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	47		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	792	792	752	752	871	871
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,55	0,55	0,65	0,65	0,50	0,50
FAS Testigo(mL)	1,55	1,55	1,60	1,60	1,60	1,60
% Remoción	64,32	64,32	66,10	66,10	60,75	60,75
DOSIS 4						
Fecha	22/11/2018		H₂O₂ (g/L)	15,6	Fe (g/L)	0,83
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	47		Relación Molar H₂O₂: Fe		31	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	673	752	634	713	634	634
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,65	0,65	0,70	0,70	0,75	0,75
FAS Testigo(mL)	1,50	1,60	1,50	1,60	1,55	1,55
% Remoción	69,67	66,10	71,46	67,89	71,46	71,46

Tabla 10. Control Muestra 4.

CONTROL DE ENSAYOS FOTO - FENTON						
MUESTRA 4						
Fecha	22/11/2018		pH muestra = 10.1			
DQO inicial(mg/L)	3013	3330				
Muestra (mL)	2,50	2,50				
FAS Muestra(mL)	0,60	0,50				
FAS Testigo(mL)	1,55	1,55				
Normalidad	0,09909900					
DQO calculo(mg/L)	3171					
ENSAYOS						
DOSIS 1						
Fecha	23/11/2018		H₂O₂ (g/L)	7,95	Fe (g/L)	0,60
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	25		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	1822	1822	1663	1663	1584	1743
Muestra (mL)	0,50		0,50		0,50	
FAS Muestra(mL)	0,35	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,55	1,55
% Remoción	42,55	42,55	47,55	47,55	50,04	45,05
DOSIS 2						
Fecha	26/11/2018		H₂O₂ (g/L)	15,9	Fe (g/L)	1,20
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	20		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	1109	1109	1109	1188	1347	1267
Muestra (mL)	0,50		0,50		0,50	
FAS Muestra(mL)	0,80	0,80	0,80	0,75	0,65	0,70
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	65,03	65,03	65,03	62,53	57,54	60,04
DOSIS 3						
Fecha	27/11/2018		H₂O₂ (g/L)	31,8	Fe (g/L)	2,40
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	22		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	713	713	713	713	792	792
Muestra (mL)	0,50		0,50		0,50	
FAS Muestra(mL)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00	1,00
FAS Testigo(mL)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
% Remoción	77,52	77,52	77,52	77,52	75,02	75,02
DOSIS 4						
Fecha	28/11/2018		H₂O₂ (g/L)	47,7	Fe (g/L)	3,60
H₂SO₄ para pH 3 (mL)	22		Relación Molar H₂O₂: Fe		22	
Tiempo de radiación (h)	1		2,5		5	
DQO final(mg/L)	594	594	594	594	634	634
Muestra (mL)	1,00		1,00		1,00	
FAS Muestra(mL)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,75
FAS Testigo(mL)	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
% Remoción	81,27	81,27	81,27	81,27	80,02	80,02