



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1316>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Application of the Photo-fenton method for the treatment of wastewater in the milky industry

Aplicação do método Foto-fenton no tratamento de águas residuais na indústria de laticínios

José Gerardo León-Chimbolema ^I
gerardo.leon@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8542>

Carlos Alcibar Medina-Serrano ^{II}
carlos.medinas@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4916-7242>

Evelyn Natalia Segovia-Obando ^{III}
evesegoviaa8@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3173-3955>

***Recibido:** 13 de mayo de 2020 ***Aceptado:** 17 de junio de 2020 ***Publicado:** 18 de julio de 2020

- I. Dr. Química, Máster en Protección Ambiental, Docente Investigador, Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Resumen

El presente artículo presenta el análisis de la eficiencia de Foto-fenton con luz artificial a diferentes potencias para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea. Se obtuvieron muestras de la quesera “Airón” ubicada en el cantón Chambo- Ecuador, las cuáles se caracterizaron de manera físico-química y biológica, para conocer las condiciones iniciales. Los parámetros analizados fueron turbidez, sólidos suspendidos, DBO₅, DQO y coliformes fecales. El método fenton se aplicó en 12 tratamientos de 1000,00mL de agua residual con variaciones en la concentración de Fe²⁺ (100,00–400,00) mg/L y H₂O₂ (4500,00 a 6000,00) mg/L, los parámetros de respuesta fueron turbidez y DQO, la concentración óptima para cada reactivo se determinó mediante gráficas que mostraban la remoción de dichos contaminantes. El método Foto-fenton logró reducir hasta el 90,00% de coliformes fecales a una potencia de 40 watts y un tiempo de contacto de 60 minutos. Se concluye que el método Foto-fenton es eficiente para el tratamiento de aguas residuales lácteas, la remoción registrada para cada parámetro es superior el 90,00%. Se recomienda realizar un estudio de trazabilidad de los reactivos fenton para analizar su variabilidad en el tratamiento y optimizar el tiempo de retención para la remoción de contaminantes.

Palabras claves: Foto-fenton; aguas residuales; tratamiento aguas.

Abstract

This article presents the analysis of the efficiency of Photo-fenton with artificial light at different powers for the treatment of wastewater from the dairy industry. Samples were obtained from the “Airón” cheese factory located in the Chambo-Ecuador canton, which were characterized in a physico-chemical and biological way, to know the initial conditions. The analyzed parameters were turbidity, suspended solids, BOD₅, COD and faecal coliforms. The fenton method was applied in 12 treatments of 1000.00mL of residual water with variations in the concentration of Fe²⁺ (100.00-400.00) mg/L and H₂O₂ (4500.00 to 6000.00) mg/L, the response parameters were turbidity and COD, the optimal concentration for each reagent was determined by means of graphs that showed the removal of said contaminants. The Photo-fenton method managed to reduce up to 90.00% of fecal coliforms at a power of 40 watts and a contact time of 60 minutes. It is concluded that the Photo-fenton method is efficient for the treatment of dairy wastewater, the removal registered for each parameter is greater than 90.00%. It is recommended to carry out a traceability study of fenton

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

reagents to analyze their variability in treatment and optimize the retention time for the removal of contaminants.

Keywords: Photo-fenton; sewage water; water treatment.

Resumo

Este artigo apresenta a análise da eficiência do Photo-fenton com luz artificial em diferentes potências para o tratamento de águas residuais da indústria de laticínios. As amostras foram obtidas da fábrica de queijos “Airón”, localizada no cantão de Chambo-Ecuador, caracterizada de maneira físico-química e biológica, para conhecer as condições iniciais. Os parâmetros analisados foram turbidez, sólidos em suspensão, DBO5, DQO e coliformes fecais. O método de Fenton foi aplicado em 12 tratamentos de 1000,00mL de água residual com variações na concentração de Fe^{2+} (100,00-400,00) mg/L e H_2O_2 (4500,00 a 6000,00) mg/L, os parâmetros de resposta foram turbidez e DQO, a concentração ideal para cada reagente foi determinada por meio de gráficos que mostraram a remoção dos referidos contaminantes. O método Photo-fenton conseguiu reduzir até 90,00% dos coliformes fecais a uma potência de 40 watts e um tempo de contato de 60 minutos. Conclui-se que o método Foto-fenton é eficiente para o tratamento de águas residuais leiteiras, sendo a remoção registrada para cada parâmetro superior a 90,00%. Recomenda-se realizar um estudo de rastreabilidade dos reagentes de fenton para analisar sua variabilidade no tratamento e otimizar o tempo de retenção para a remoção de contaminantes.

Palavras-Chave: Foto-fenton; águas residuais; tratamento de água.

Introducción

Las aguas residuales en un inicio provenían del uso urbano-doméstico, y su composición no variaba significativamente, por tanto, los métodos de tratamiento aplicados eran muy normalizados y limitados. A raíz de la industrialización se han comenzado a producir aguas residuales de diverso tipo, que requieren tratamientos más complejos. (Ramalho, 1996).

Por su parte, la industria láctea y sus derivados se considera el mayor contribuyente de producción de efluentes de transformación de alimentos en muchos países, se requieren grandes cantidades de agua en todos los pasos del proceso productivo y de limpieza. (Arocena, Chalar, Perdomo, Fabián, Pacheco, González, & García, 2016) En general el efluente se caracteriza por ser neutro o alcalino

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

susceptible a la acidificación por su fermentación. (Tirado Armesto et al. 2016) Alta concentración de materia orgánica y grasas, DBO, DQO y sólidos en suspensión en donde se desarrollan varios tipos de microorganismos patógenos. El volumen, concentración y composición depende del tipo de producto, forma de producción y planta procesadora. (Farizoglu y Uzuner 2011)

Los Procesos de oxidación avanzada (POA) son altamente utilizados a nivel internacional debido a su eficiencia para tratamiento de aguas residuales industriales con cargas contaminantes similares a la industria láctea, es decir, de origen orgánico. Uno de los procesos más destacados de estas tecnologías es el método Foto-fenton, que puede reducir los principales contaminantes como DBO, DQO, Sólidos Suspendidos y Coliformes (Programa Consolider Tragua, 2010). En nuestro país este proceso se aplica al tratamiento de lixiviados, obteniendo importantes resultados. Pero limitando su investigación para diferentes tipos de aguas residuales, como es el caso de la industria de producción de lácteos, en dónde podría ser utilizado.

Por su parte, las tecnologías convencionales de tratabilidad consisten en un tratamiento primario seguido de un tratamiento biológico (filtro de goteo, proceso de lodos activados, laguna anaerobia y laguna aerobia) Estos métodos son bastante eficientes para el tratamiento a gran escala. (Adams & Doungan, 1981) No obstante, el volumen de agua residual generada en la industria artesanal en las zonas rurales es pequeña, con grandes variaciones en la calidad. Los sistemas de tratamiento biológico son tecnologías altamente costosas de forma que adoptarlas en las pequeñas industrias lácteas no es posible desde la perspectiva financiera y de operación, (Patiño, Díaz y Ordoñez, 2014) por este motivo, surge la necesidad de investigar tecnologías que cumplan el grado de tratabilidad exigido por la legislación y permitan la recuperación de los recursos hídricos.

En consecuencia, los procesos de oxidación avanzada constituyen una buena alternativa, ya que, a más de lograr reducir significativamente la carga contaminante son de bajo costo y fácil de manejo. De esta manera el proceso de oxidación avanzada denominado Foto-fenton transforma químicamente el contaminante para alcanzar su mineralización y oxidación completa. (Terán,2016). El tratamiento es óptimo para aguas residuales industriales con porcentajes elevados de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbidez y carbono orgánico total (COT), (Salas,2010), logrando un porcentaje de remoción de 90 a 95%. Adicionalmente al incorporar luz ultravioleta se eliminan agentes patógenos y en general todo tipo de material biológico contaminante.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

En consecuencia, el método Foto-fenton es adaptable a la industria láctea, (Lobo,2014) de manera industrial o artesanal, debido a que es aplicable en cualquier variación de caudal y calidad del agua residual, pero utilizando menos recursos económicos y tiempo.

Con base a las consideraciones anteriores, este artículo presenta el trabajo desarrollado aplicando la metodología de Foto-fenton con potencias de 10, 20 y 40 watts para el tratamiento de aguas residuales de muestras obtenidas de la quesera “Airón” ubicada en el cantón Chambo las cuáles se caracterizaron de manera fisicoquímica y biológica.

Metodología

La investigación se realizó mediante el método de investigación cuantitativa y un diseño experimental, en donde se identificó la variable dependiente: Eficiencia de remoción de contaminantes y las variables independientes: Concentración Fe^{2+}/H_2O_2 , Potencia lumínica y Tiempo.

Tabla 1: Operacionalización de variables

Variable	Concepto	Indicador	Instrumento
Variables independientes: Fe^{2+}/H_2O_2	Reacción fenton: Concentración de los iones de hierro y peróxido de hidrógeno óptimos para la reducción de contaminantes.	Turbidez DQO	Equipo de agitación múltiple Turbidímetro Potenciómetro
Potencia lumínica	Cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido.	Microorganismos (coliformes)	Estufa Placas
Tiempo de contacto	Lapso en el que el agua residual está en contacto con la luz UV		

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Variable dependiente:	Porcentaje de remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales lácteas.	% remoción DBO % remoción DQO % remoción SS % remoción Turbidez % remoción Coliformes fecales	Botellas ámbar Digestor de DQO Digestor de DBO Espectrofotómetro o Turbidímetro Estufa
Eficiencia de remoción de contaminantes.			

Fuente: Autores, 2019

Muestra

Se analizaron las aguas residuales provenientes de la Quesera “Airón”. A través de un muestreo simple se tomaron 4,00 litros de agua residual proveniente de la Quesera “Airón” para la caracterización inicial en botellas de vidrio. Se tomaron 6,00 litros de agua cada tres días durante seis semanas para el tratamiento. Para los análisis microbiológicos se tomaron 2 muestras de 0,25 litros en frascos estériles. Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 4°C y se almacenaron protegiendo de los rayos solares. En un período de 1 hora fueron entregadas a los laboratorios para los respectivos análisis.

Caracterización del agua residual

La caracterización para los análisis físicoquímicos y biológicos de las aguas residuales se llevó a cabo en el laboratorio de servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo y en el laboratorio de Servicios Analíticos, Químicos y Microbiológicos AQMIC. Tabla 2 y 3.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Tabla 2: Métodos usados por Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH

Parámetros	Método/Norma
Turbiedad	STANDARD METHODS 2130 B
Sólidos Suspendidos	STANDARD METHODS 2540 D
DBO ₅	STANDARD METHODS 5210 – B
DQO	STANDARD METHODS 5220 – D mod
Coliformes Totales	STANDARD METHODS 9221 C
Coliformes fecales	STANDARD METHODS 9221 C

Fuente: Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH

Tabla 3: Métodos usados por Laboratorio AQMIC

Parámetros	Método/Norma (Métodos Normalizados APA, AWWA, WPCF)
Turbiedad	STANDARD METHODS 2130 B
Sólidos Suspendidos	STANDARD METHODS 2540 D
DBO ₅	STANDARD METHODS 5210 – B
DQO	STANDARD METHODS 5220 – D mod
Coliformes Totales	STANDARD METHODS 9221 C
Coliformes fecales	STANDARD METHODS 9221 C

Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos AQMIC

Aplicación del método Fenton

- Preparación de la solución madre: La solución madre se preparó a partir de Sulfato Ferroso puro (FeSO₄)

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Se pesó 10 g de $FeSO_4$ y se aforó con agua destilada en un balón de 100 mL. Se realizaron los siguientes cálculos:

$$\frac{10g FeSO_4}{100 mL agua destilada} * \frac{1000 mg}{1 g} * \frac{1000 mL}{1 L} = 100000 \frac{mg}{L} FeSO_4$$

Ecuación 1-1: Solución de reserva

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$C_2 = \frac{C_1 * V_1}{V_2}$$

$$C_2 = \frac{100000 \frac{mg}{L} (FeSO_4) * 1mL}{1000mL}$$

$$C_2 = 100 \frac{mg}{L}$$

1mL de solución de $FeSO_4$ contiene 100 mg/L (ppm) que equivale a 1% de concentración.

b) Concentración óptima de Hierro y Peróxido de Hidrógeno

Se realizaron 13 tratamientos a los cuales se les adicionó las cantidades presentadas en la tabla 14-3. El Fe^{2+} varía en el rango de 100,00 (mg/L) a 400,00, (mg/L) y el H_2O_2 varía de 4500,00 (mg/L) a 6000,00 (mg/L). El hierro fue preparado a partir de una solución de 1% de concentración de Sulfato ferroso y el Peróxido de hidrógeno a partir de una concentración al 30%.

Los ensayos se prepararon en vasos de precipitación de 1000,00 mL volumen, se midió los valores iniciales de pH, conductividad, DQO y turbidez.

Se realizó una mezcla rápida a 300 rpm pasados 10 minutos se disminuyó la velocidad de agitación a 100rpm durante 20 minutos.

Pasadas 72 horas se mide y registra la turbidez.

A las muestras que presentan menor turbidez se les mide la DQO.

La dosis adecuada será aquella que registre el menor valor de estos dos parámetros.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Hallada la dosis óptima se realizaron tres réplicas y se midió la turbidez y la DQO.

c) Ajuste de pH

Se realizaron 4 ensayos en vasos de precipitación de 1000,00 mL con el mismo volumen de muestra y se adicionó la concentración óptima obtenida de FeSO_4 y H_2O_2 .

Se agregó ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1 N para obtener los pH de 2,00, 2,50, 3,00 y 3,50 en cada muestra, se agitó a 300rpm durante 10 minutos, se disminuyó la velocidad de agitación a 100rpm durante 20 minutos y se dejó en reposo durante 72 horas.

La turbidez fue registrada antes y después del procedimiento, el pH óptimo fue el que registró menor valor de turbidez.

Aplicación del método Foto-fenton

a) Foto-fenton

Se realizaron tres muestras de 1000,00 mL del agua tratada con la concentración óptima de H_2O_2 y Fe^{2+} . Fueron expuestas a luz UV mediante el uso de tres reactores de 10, 20 y 40 Watts y se consideró una muestra blanca.

El agua se incorporó en los tres reactores UV de manera simultánea, pasado el tiempo de contacto se determinó el material biológico y su porcentaje de remoción.

b) Determinación del tiempo de contacto

A los 15, 30, 45 y 60 minutos de iniciado el proceso Foto-fenton, se determinó la carga de microorganismos.

El valor óptimo corresponde al tiempo mínimo requerido para obtener el mayor porcentaje de remoción en cada una de las lámparas.

Análisis de la eficiencia de remoción de los contaminantes

Para determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes se aplicó la siguiente fórmula (Malacatus, Chamorro y Orellana 2016):

$$\%E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$$

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

En dónde;

E : Eficiencia (%)

S_0 : Concentración del contaminante antes de ser tratado (mg/L)

S : Concentración del contaminante después del tratamiento (mg/L)

Los parámetros denominados “contaminantes” fueron: turbidez, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y coliformes fecales. El cálculo de la eficiencia permitió conocer su porcentaje de remoción en las aguas residuales.

Resultados

Tabla 4: Análisis microbiológico del agua previo a la aplicación del proceso Foto-fenton

Parámetro	Resultado (UFC/100 mL)
Coliformes fecales	500,00

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

La concentración inicial de coliformes fecales fue en promedio de 3560,00 UFC/100mL y la concentración final fue de 500,00 UFC/100mL. El porcentaje de remoción es de 85,95%.

Como afirma (Barrera et al. 2013) en su estudio de Hidro-biología, las bacterias coliformes son los indicadores más confiables en la predicción de otros microorganismos patógenos como enterobacterias, entre ellas *Salmonella* y *Shigella*, responsables de varias infecciones en el ser humano. De aquí la importancia de su análisis.

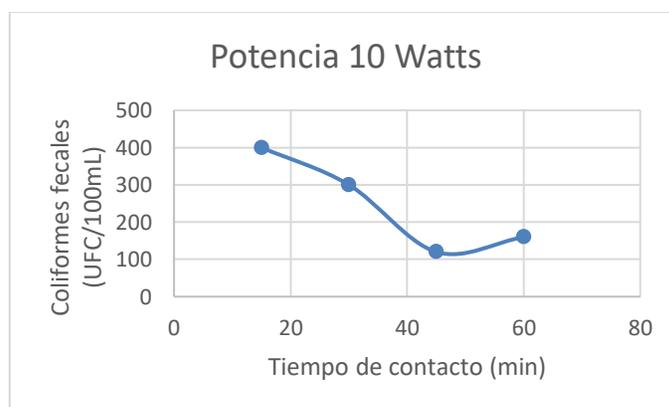
Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Tabla 5: Aplicación del método Foto-fenton

Tratamientos	Potencia de las lámparas (Watts)	Tiempo de contacto (min)	Coliformes fecales (UFC/100 mL)	Eficiencia de remoción de coliformes (%)
1	10	15	400	20,00
2	10	30	300	40,00
3	10	45	120	76,00
4	10	60	160	68,00
5	20	15	90	82,00
6	20	30	81	83,80
7	20	45	78	84,40
8	20	60	50	90,00
9	40	15	82	83,60
10	40	30	72	85,60
11	40	45	65	87,00
12	40	60	50	90,00

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Gráfico 1: Variación de coliformes fecales a una potencia de 10 Watts



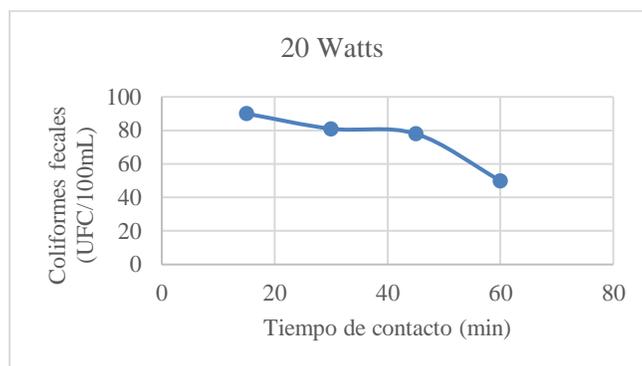
Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Como se observa en el gráfico 1 la lámpara de 10 Watts de potencia muestra la menor eficiencia registrada para remoción de material biológico, se logra un porcentaje de remoción de coliformes

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

de hasta 68% en 60 minutos, un resultado bajo en comparación con los tratamientos con mayor potencia de lámparas.

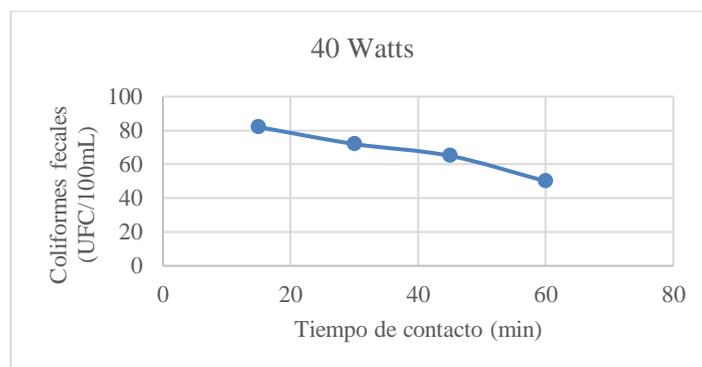
Gráfico 3: Variación de coliformes fecales a una potencia de 20 Watts



Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Al aumentar la potencia a 20 Watts (tabla 5) la eficiencia de remoción varía de 82,00% a 90,00%, esto indica que existe una relación entre la potencia de la lámpara y la eficiencia del tratamiento, por este motivo se forma una curva descendente (gráfico 2). El mejor resultado se da al mayor tiempo de contacto (tratamiento 8).

Gráfico 4: Variación de coliformes fecales a una potencia de 40 Watts



Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Con el uso de la lámpara de 40 Watts, al igual que el caso anterior se forma una curva descendente como se observa en el gráfico 3, debido a la eliminación del material biológico con el transcurso del tiempo.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Mientras aumenta el tiempo de contacto, disminuye la carga contaminante, como se observa en la tabla 17-3. De igual manera ocurre con la potencia de las lámparas, al aumentar, tiene mayor eficiencia de remoción. Las lámparas de 20 y 40 watts de potencia muestran altos porcentajes de remoción que mejoran a medida que aumenta el tiempo de contacto, los tratamientos 8 y 12 mostraron los mejores resultados, a los 60 minutos de contacto con una eficiencia de remoción del 90% de coliformes fecales. La mejor opción de tratamiento es la lámpara de 20 watts debido a que los costos de implementación son menores comparados a la lámpara de 40 watts y su eficiencia es la misma.

La eficiencia de remoción de contaminantes biológicos se debe a dos factores fundamentales, la longitud de onda de las lámparas UV y el contenido de sólidos suspendidos. Según (Trojan engineering, 1994; citado en CONAGUA 2011) se debe el uso de lámparas UVC, las cuales se encuentran entre 200 – 280nm y cuentan con las longitudes de onda más efectivas para la tarea germicida, siendo la longitud óptima la de 254nm. En cuanto a los sólidos suspendidos, (CONAGUA 2011) da a conocer que mientras exista menor material coloidal, la luz puede penetrar completamente en los microorganismos ocasionando su destrucción. Por ende, el agua residual previamente tratada mediante el proceso fenton que obtuvo valores muy bajos de sólidos en suspensión es óptima para el tratamiento de Foto-fenton.

La baja eficiencia observada a los 10 minutos de contacto como indica la tabla 17-3, se debe a que no existió un tiempo previo de calentamiento de los reactores, en este caso, se da la evaporación de mercurio, aumenta la presión y la luz UV comienza a producirse, en este tiempo, la alta densidad de las moléculas gasificadas de mercurio impide la salida de la luz UV y por ende su contacto con el agua residual. (CONAGUA 2011)

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

Análisis de la variación de la carga contaminante

Tabla 6: Análisis de la eficiencia de remoción de la carga contaminante

Parámetros	Unidades	Resultados previos al tratamiento	Resultados posteriores al tratamiento	Eficiencia de remoción de contaminantes (%)
pH	-	5,80	5,02	-
Conductividad	mS	3,30	4,50	-
Turbidez	NTU	347,5	0,77	99,78
Sólidos suspendidos	mg/L	656,5	11,00	98,32
DBO ₅	mg/L	4165,0	151,00	96,37
DQO	mg/L	6925,0	539,25	92,21
Coliformes fecales	UFC/100 mL	3560,0	50,00	98,60

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Debido a que las reacciones fenton se producen en un medio ácido, el pH al finalizar el tratamiento fue de 3,40. Para alcanzar los límites permisibles se usó 1,70 mL de Hidróxido de sodio (NaOH) 5,00 N, el cual no altera las características del agua tratada.

La eficiencia del método Foto-fenton se analiza de acuerdo con el porcentaje de remoción de contaminantes. En todos los casos es superior al 90%. La mayor eficiencia se dio para la turbidez con un 99,78% de remoción y para el material biológico expresado como coliformes fecales con un 98,60% de remoción, gran parte de este fue logrado en la etapa de aplicación de método físico-químico sin irradiación, sin embargo, la luz UV fue fundamental para llegar a estos niveles y cumplir la normativa para su vertido sea a cuerpos de agua dulce o al sistema de alcantarillado. La baja concentración de sólidos suspendidos contribuye a obtener estos resultados.

La demanda química de oxígeno (DQO) con un 92,21% de eficiencia de remoción, partiendo de una concentración de 6925,00mg/L disminuye a 539,25mg/L, a pesar de ser el parámetro con menor remoción en este estudio, es el más significativo al compararlo con investigaciones en diversos tipos de aguas residuales. En el tratamiento de lixiviados según la recopilación de varios

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

estudios realizada por (Méndez, Iván et al. 2010) muestra una eficiencia de 38% a 85%, en la industria de café soluble según (Ibarra-Taquez, Dobrosz-Gómez y Gómez 2018) varía entre 53,36% a 73,95%, para efluentes químicos (Avendaño y Reyes 2012) señalan aproximadamente el 81%, en la industria petroquímica el 97,50% (Rubio-Clemente, Chica y Peñuela 2014). En la industria láctea, como se ha mencionado previamente, este método no ha sido estudiado profundamente, sin embargo, teniendo en cuenta a (Menéndez 2018) existe una remoción de DQO del 78,93% en lacto-suero.

Según (Aranibar, 2016) la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) va ligada a la DQO ya que ambos son indicadores de la carga orgánica presente, es decir, que al lograr una reducción del 96,36%, lo que se ha conseguido es reducir ampliamente la carga orgánica contaminante. En muchos casos, conocer la concentración de la DBO da una idea de la carga total de DQO o viceversa. En los ensayos que resultaron con alta concentración de DQO, la DBO se mantuvo baja, esto debido a que los contaminantes fueron oxidados pero el hierro se mantuvo en la muestra ya que no tenía las condiciones correctas para reaccionar.

Como se observa en la tabla 18-3 todos los parámetros analizados cumplen con la normativa ecuatoriana sobre límites de descarga al sistema de alcantarillado tabla 1-1, a excepción de la DQO que se encuentra muy cerca del límite.

Conclusiones

El método Foto-fenton a mayor potencia es el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea, ya que la potencia de 40 watts mostró los mayores niveles de remoción de contaminantes, sin embargo, la potencia óptima para el tratamiento debe ser superior, para que se logre la remoción del material biológico en menor tiempo de contacto. O a su vez el tiempo de contacto debe ser aumentado conservando la potencia.

Los parámetros óptimos de operación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales lácteas son: $Fe^{2+}=331,50\text{mg/L}$, $H_2O_2=5537,00\text{mg/L}$, $pH=3,00$, potencia lumínica=20 watts, tiempo de contacto = 72 horas.

Los reactores UV permitieron la remoción del 98,6% de material biológico contaminante presente en las aguas residuales. La eficiencia de remoción aumenta de manera continua con el aumento de la potencia lumínica y el tiempo de contacto con la luz.

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

El agua residual logró cumplir con los límites permisibles exigidos por la Normativa Ecuatoriana TULSMA: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público. A excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) que sobrepasa con 39,25mg/L el límite. La eficiencia de remoción de los contaminantes se expresa en porcentaje, y es la siguiente: Turbidez = 99,78%, Sólidos suspendidos = 98,32%, DBO₅ = 96,37%, DQO = 92,21%, Coliformes fecales = 98,50%.

Referencias

1. Arocena, R., Chalar, G., Perdomo, C., Fabián, D., Pacheco, J. P., González, M., ... & García, P. (2016). Impacto de la producción lechera en la calidad del agua. Serie FPTA N°60 INIA.
2. Adams, M. R., & Dougan, J. (1981). Biological management of coffee processing wastes. *Tropical Science*, 23(3), 177-196.
3. Ministerio del Ambiente, 2017. Revisión y actualización de la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente. S.l.: s.n.,
4. Farizoglu, b. Y uzuner, s., 2011. The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system. *Biochemical engineering journal*, vol. 57, no. 1, pp. 46-54. Issn 1369703X. DOI 10.1016/j.bej.2011.08.007.
5. Lobo, C. C. (2014). Tratamiento biológico de aguas residuales industriales (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
6. Programa Consolider Tragua, 2010. Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 5 junio 2019]. ISBN 978-84-695-3985-9. Disponible en: http://www.consolider-tragua.com/documentos/tecnologias_tratamiento_agua.pdf
7. Patiño, Y., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y sistemas de tratamiento. *Avances en ciencias e ingeniería*, 5(2), 1-20.
8. Sette Ramalho, R. (2006). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: REVERTÉ, SA.
9. Salas, G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30-38.
10. Terán Solíz, M. C. (2016). Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea

11. Tirado Armesto, D.F., Gallo García, L.A., Acevedo Correa, D. Y Mouthon Bello, J.A., 2016. Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea. Producción + Limpia [en línea], vol. 11, no. 1, pp. 171-184. [Consulta: 23 junio 2019]. ISSN 19090455. DOI 10.22507/pml.v11n1a16. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125>.