



ARTÍCULO ORIGINAL

Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un reactor de lecho empacado

Jesús Emmanuel García Valencia^{1*}, Raúl Alejandro Limón Hernández¹, Iriana Hernández Martínez¹, Verónica López Hernández¹, Miriam Minerva Jiménez Lara² y Beatriz Adriana Dueñas Gallegos²

¹Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Campus Gutiérrez Zamora, Veracruz, México

²Universidad Tecnológica de Manzanillo, Manzanillo, Colima, México

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2022; fecha de aceptación del artículo: 04 de julio de 2022.

PALABRAS CLAVE

Agua residual; beneficio de café; biorreactor; Biopelícula.

Resumen

El café es considerado como una de las principales materias primas de mayor seguimiento económico a nivel mundial, en México representa uno de los principales cultivos industriales, especialmente en los estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz. En el proceso de beneficio húmedo del café de una empresa ubicada en Huatusco, Veracruz, el agua se utiliza como servicio para el proceso de lavado cuyo objetivo es retirar la materia orgánica del fruto para obtener la semilla de café con lo que se genera un agua residual denominada aguamiel. De acuerdo con Limón *et al.*, (2021) el agua residual tiene un índice alto de biodegradabilidad por lo que el uso de un tratamiento biológico puede ser viable para el tratamiento del agua residual tal y como se ha demostrado por Hernández *et al.*, (2021) quien aplicó un biofiltro para la depuración. Por tal motivo, el presente proyecto tuvo la finalidad de evaluar la depuración de agua residual de beneficio de café mediante el uso de un reactor de lecho empacado. Se realizó un diseño experimental ²² con dos variables y dos niveles: tiempo de maduración de la biopelícula (24 h y 48 h) y aireación (presencia o ausencia). La metodología desarrollada constó de 5 pasos que son: el diseño experimental, la activación y adaptación de la cepa, formación de la biopelícula, construcción del reactor de lecho empacado, caracterización del agua residual y análisis estadístico de resultados. Se encontró que el tratamiento a 24 horas con aireación y el de 48 horas sin aireación arrojan remociones mayores al 95 %, lo cual indica que se tienen dos alternativas para el tratamiento del agua, sin embargo, debido a los gastos energéticos generados en el proceso de aireación se puede considerar más viable el segundo tratamiento.

Correspondencia: Jesús Emmanuel García Valencia. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Ingeniería en Procesos Químicos, Campus Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora-Boca de Lima Km 2.5 Gutiérrez Zamora, Veracruz, México, Tel.: 7668451952, correo electrónico: 18610112@utgz.edu.mx

ISSN en trámite - Revista Multidisciplinaria de Ciencia Innovación y Desarrollo © 2022. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora. Todos los derechos reservados

KEYWORDS

Wastewater; coffee processing; biorreactor; biofilm.

Abstract

Coffee is considered one of the main raw materials with the greatest economic follow-up worldwide, in Mexico it represents one of the main industrial crops, especially in the states of Oaxaca, Chiapas and Veracruz. In the coffee processing company located in Huatusco Veracruz, the water is used as a service for the washing process whose objective is to remove the organic matter of the fruit to obtain the coffee seed with which a residual water is generated, called coffee processing wastewater. According to Limón *et al.*, (2021), wastewater has a high biodegradability index, so the use of a biological treatment can be viable for wastewater treatment, as has been shown by Hernández *et al.*, (2021) who applied a biofilter for depuration.

For this reason, the purpose of this project was to evaluate the depuration of wastewater from coffee processing through the use of a bio-packed bed reactor. An experimental design 2^2 with two variables and two levels was carried out: biofilm maturation time (24 h and 48 h) and aeration (presence or absence). The developed methodology consisted of 5 steps that are the experimental design, the activation and adaptation of the strain, biofilm formation, construction of the packed bed reactor, wastewater characterization and statistical analysis of results. It was found that the 24-hour treatment with aeration and the 48-hour treatment without aeration yield removals greater than 95 %, which indicates that there are two alternatives for water treatment, however, due to the energy costs generated in the process of aeration, the second treatment can be considered more viable.

Introducción

El café es considerado como una de las principales materias primas con mayor seguimiento económico a nivel mundial; en México representa uno de los principales cultivos industriales, especialmente en los estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz (Vichi, 2015; Alfonse *et al.*, 2018). Su proceso de producción puede ser obtenido mediante el beneficio seco y el beneficio húmedo. Este último es ampliamente utilizado debido a que es un método rápido en comparación con el anterior. Sin embargo, su desventaja principal, es el alto consumo de agua que necesita, así como las grandes cantidades de agua residual que se generan, las cuales son descargadas en los suelos y cuerpos de agua con poco o nulo tratamiento (Vázquez, 2016).

Estas aguas residuales o aguas mieles son de color marrón e inicialmente presentan un olor similar a miel, el cual se va modificando con el paso de los días. La naturaleza físicoquímica del agua residual consta de un pH ácido, con niveles deficientes de oxígeno disuelto y altas cargas de materia orgánica (pectinas hidrolizadas, proteínas, carbohidratos, fibras, grasas, cafeína, polifenoles, nitratos, amonio, ácidos tánicos) y altos niveles de materia orgánica soluble que se traducen en una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y una Demanda Química de Oxígeno (DQO) elevadas (Villanueva, 2014; Sujatha, 2020; Hernández, 2021). Esto representa un impacto ambiental negativo, puesto que, existe un mayor

riesgo de modificación en la acidez natural de los cuerpos de agua receptores, así como un menor rendimiento de los suelos por la alteración de la microbiota a causa de los ácidos orgánicos que se producen en la descomposición de la materia presente (Cruz-Salomón *et al.*, 2017).

Por este motivo, es necesaria la implementación de sistemas de tratamiento que permitan la depuración adecuada de dicha agua residual. Los reactores de biopelícula representan una tecnología atractiva con altas capacidades de carga de biomasa concentrada, resistencia a las sobrecargas hidráulicas u orgánicas con ningún requisito de mezcla mecánica; logrando reducir los tiempos de puesta en marcha y aumentar las tasas de carga orgánica hasta cinco veces más (Pérez, 2017). La biopelícula es una asociación de células microbianas que generalmente construyen y viven en conglomerados o comunidades celulares, los cuales por acción físicoquímica retienen contaminación orgánica y se alimentan de ella. Estas bacterias se agrupan en colonias con el fin de buscar protección frente posibles condiciones adversas, así los microorganismos tenderán a unirse entre sí, siendo capaces de adherirse a superficies como tuberías de PVC, tejidos vivos, accesorios metálicos, polímeros plásticos, entre otros (Larico y huaynacho, 2021; Jiménez-Pichardo, 2021; Wickens, 2014). El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la depuración de agua residual de beneficio de café mediante el uso de un reactor de lecho empacado.

Material y métodos

El presente trabajo fue realizado en el laboratorio de química de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora durante el periodo enero-abril de 2022, el cual consistió de los siguientes pasos.

Diseño experimental

Se empleó un diseño factorial completo 2^2 con dos variables y dos niveles, la primera variable corresponde al tiempo de maduración de la levadura con valores de 24 h y 48 h para evaluar la formación de la biopelícula y la segunda variable a la aireación, con valores de 0 (ausencia) y 1 (presencia) con el fin de medir las eficiencias de remoción. Cabe resaltar que las experimentaciones se realizaron por triplicado.

Activación y adaptación de la cepa

Para la activación de la levadura se siguió la metodología marcada por Hernández *et al.* (2021), en un vaso de precipitado de 1 L se agregó 100 g de levadura seca (*Saccharomyces cerevisiae*) con 50 g de sacarosa, se añadió 1 L de agua a 30 °C. La adaptación de la cepa se llevó a cabo durante 3 días agregando diluciones de agua residual en concentraciones de 25 %, 50 % y 75 %.

Formación de la biopelícula

En el último día de maduración se vertió la biomasa en los canutillos cerámicos, los cuales fueron previamente lavados y acomodados en charolas de aluminio, para así comenzar con el proceso de formación de la biopelícula en los tiempos marcados por el diseño experimental, 24 h y 48 h respectivamente.

Construcción del reactor de lecho empacado

Los reactores consistieron de 6 recipientes de polietileno de alta densidad, de los cuales tres fueron adaptados con un sistema de difusión de aire para cumplir con las variables de aireación marcadas. Enseguida a cada reactor se le colocaron 500 g de canutillo con la biopelícula ya formada, para posteriormente verter el agua residual y de esta manera comenzar con el proceso de experimentación.

Caracterización del agua residual

Cada 24 horas se tomaron muestras de agua de los reactores y se caracterizaron. Se utilizaron 100 mL de agua residual en donde se sumergió un potenciómetro portátil marca HANNA® Instruments modelo 98129 previamente calibrado con soluciones patrón de 20 mL de pH de 4.1 y 7.1 y conductividad de 1413 mS/cm y se cuantificaron los parámetros: temperatura, pH, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica. De igual forma se realizó la cuantificación de sólidos suspendidos totales por gravimetría.

Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de la experimentación se procedió a analizarlos con ayuda del software Microsoft Excel y el programa SAS JMP STATISTICAL V.8.0, donde se calcularon los promedios, desviaciones estándar, así como la realización de gráficos de comportamiento, de regresión, análisis de varianza (ANOVA) de mediciones en el tiempo y pruebas de Tukey-Kramer considerando como valor $p \leq 0.05$.

Resultados

En la tabla 1 se pueden apreciar los valores de la caracterización inicial del agua residual de beneficio de café.

Tabla 1. Valores de la caracterización de agua residual

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	17.07 ± 0.45
pH	4.21 ± 0.02
TDS (ppm)	212.6 ± 0.58
Conductividad (µS/cm)	425.33 ± 0.58

Comparando los resultados obtenidos con los de Hernández *et al.*, (2021); Sujatha *et al.*, (2020) y Rattan *et al.*, (2015), se puede mencionar que los valores de pH, conductividad eléctrica y TDS son similares o cercanos entre sí. Teniendo valores de 4 a 4.5 para pH, 220 µS/cm a 993 µS/cm para conductividad eléctrica y valores

entre 267 mg/L a 995 mg/L para TDS. Lo siguiente fue realizar un gráfico de regresión (figura 1) comparando los porcentajes de remoción obtenidos después de 6 días de tratamiento.

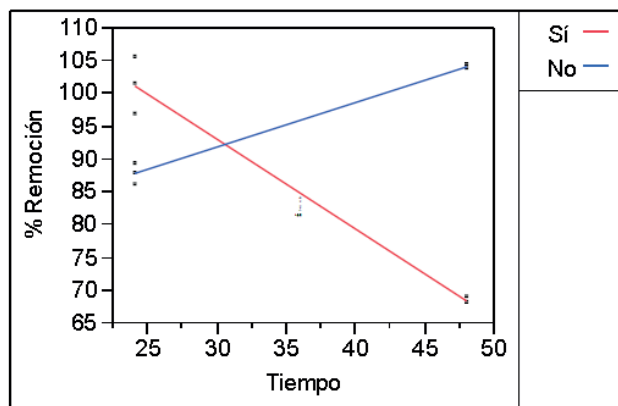


Figura 1. Gráfica de regresión del porcentaje de remoción de acuerdo a Si (presencia de O₂), No (ausencia de O₂)

En la figura 1 se presenta una comparación entre el tiempo de maduración de la cepa (24 h y 48 h) y la presencia o ausencia de oxígeno (sí y no) después de 6 días de operación. Al analizar el comportamiento de la gráfica se puede deducir que a un tiempo de 24 horas en ausencia de oxígeno los porcentajes de depuración son bajos (menor al 90 %), los cuales aumentan si el tiempo de maduración se incrementa a 48 horas.

Posteriormente a un tiempo de 24 horas con aireación se obtienen porcentajes mayores al 90 %, mismos que descienden hasta menos del 80 % cuando el tiempo de maduración es largo. Por otra parte, observando el valor *p*, tanto general como el de la interacción Tiempo*Aire, se aprecia que son estadísticamente significativos, es decir que ningún tratamiento es igual entre sí. Por otra parte, la *R*² ajustada fue de 0.9754 lo que indica un buen ajuste en los datos y por ende la variable respuesta no fue afectada.

Con base en la figura 1, se determinó que el tratamiento con aire a 24 horas es el mejor, debido a que en un corto tiempo de maduración de la cepa se obtienen altas remociones al igual que si se tuviera un tiempo de maduración de 48 horas. Seguido de esto se realizó una gráfica de comportamiento para determinar estadísticamente qué tan diferentes o iguales son los tratamientos a 24 horas con y sin aireación.



Figura 2. Comportamiento de la remoción de contaminante a 24 y 48 horas con aireación

Observando la figura 2 se puede determinar que ambos tratamientos desde el día 1 ya presentaban remociones por encima del 75 %, posteriormente estos fueron variando conforme los días, pero al final de la experimentación no hubo una diferencia de remoción elevada.

Tabla 2. Tabla de porcentajes de remoción para el tratamiento a 24 h aerobio y anaerobio

Día	Porcentaje de remoción	
	Aerobio	Anaerobio
3	101.91 ± 8.75a	81.88 ± 4.53b
6	101.34 ± 7.85a	87.88 ± 8.36ab
4	97.66 ± 7.28a	85.49 ± 9.56ab
2	92.96 ± 3.88a	86.09 ± 3.87ab
1	90.99 ± 10.78a	78.09 ± 1.49b
5	90.18 ± 4.35a	83.11 ± 4.47ab

*Valores con letras diferentes representan diferencia estadística significativa (*p* ≤ 0.05)

De acuerdo con la tabla 2, a 24 horas de formación de la biopelícula las remociones de materia contaminante son estadísticamente iguales entre sí a lo largo del tiempo, ya sea un proceso aerobio o anaerobio, puesto que, desde el día 1 al 6, el promedio de remoción es similar entre los tratamientos correspondientes al mismo tipo de proceso. Sin embargo, existe una

diferencia estadística significativa entre los resultados máximos obtenidos al tercer día, donde se indica que el mejor tratamiento es a 24 horas con aireación y un tiempo de remoción de 3 días.

Discusión

De acuerdo con las características físicoquímicas obtenidas el agua residual es altamente contaminante, sobre todo por el valor de pH que presenta, el cual indica que es muy ácida. Analizando los porcentajes de remoción después de 6 días de operación se observa que estos tienden a aumentar o decrecer de acuerdo con el tiempo de formación de la biopelícula y la presencia o ausencia de aire, donde las dos experimentaciones con mejores resultados fueron a 24 horas de formación de la biopelícula con aireación y a 48 horas sin aireación. Determinar cuál es el más viable dependerá del nivel de carga contaminante que se requerirá depurar, las dimensiones del reactor, el tiempo de maduración de la cepa y el consumo energético del equipo aireador en caso de ser necesaria la entrada de aire. De acuerdo con los resultados anteriores, a 24 horas con presencia de aire, se obtienen resultados viables, si bien la presencia de un aireador representa un costo energético, con la prueba de Tukey-Kramer fue posible determinar el día donde se obtienen mayores porcentajes de depuración. Encontrando que para el proceso con aireación la mayor remoción se encuentra al tercer día, teniendo una diferencia significativa cercana al 20 % en el proceso anaerobio. Cabe mencionar que se consideró al agua corriente utilizada en el proceso como el estándar de depuración, sin embargo esta agua inicialmente presentaba una ligera contaminación por compuestos orgánicos y por ello se visualiza que el porcentaje de remoción puede ser superior al 100 % en algunos casos a causa de que el agua tratada al final quedó más limpia que el agua original.

Conclusiones

Pese a que los resultados estadísticos son relativamente iguales en tiempos de remoción conforme a los días de operación, el tratamiento a 24 horas con aireación durante un lapso de tres días, resultó ser la mejor opción, puesto que obtuvo un porcentaje de remoción cercano al 100 % y por tal motivo es altamente viable, ya que solo se necesitan de un tiempo de 24 horas para la formación de la biopelícula e inmediatamente de esto se pone a trabajar durante

tres días para así depurar el agua en su totalidad. Además, el agua tratada cumple la normatividad NOM-001-SEMARNAT-1996 por lo que su descarga puede darse sin mayor impacto ambiental, lo cual establece un compromiso por el beneficio de café con la sustentabilidad.

Contribución de los autores

JEGV, trabajo experimental y redacción.

RALH, diseño, recolección de datos y redacción.

IHM, diseño experimental, análisis de resultados y redacción.

VLH, recolección de datos, análisis de resultados y redacción.

MMJL, diseño experimental y análisis de resultados.

BADG, diseño y recolección de datos

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Alfonse, A., Trejo, J. y Martínez, M. (2018). Opción climática para la producción de café en México. *Revista de economía*, 37(2), 135-154.
2. Alemayehu, Y., Asfaw, S., y Tirfie, T. (2020). Management options for coffee processing wastewater. A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(2), 454-469.
3. Arriel, J., Batista, P., Silva, M., dos Santos, C., y Duarte, A. (2016). Enzymatic oxidation of phenolic compounds in coffee processing wastewater. *Water Science and Technology*, 73(1), 39-50.
4. Cruz, A., Ríos, E., Pola, F., Lagunas, S., Meza, R. y Ruíz, V. (2017). Evaluation of hydraulic

- retention time on treatment of coffee processing wastewater (CPWW) in EGSB bioreactor. *Sustainability*, 10(1), 83-87.
5. Duque, P., Heras, C., Lojano, D., y Vilorio, T. (2018). Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios. *CIENCIA UNEMI*, 11(28), 88-96.
 6. Fereja, W., Tagesse, W., y Benti, G. (2020). Treatment of coffee processing wastewater using *Moringa stenopetala* seed powder: Removal of turbidity and chemical oxygen demand. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 18-25.
 7. Hernández, B. (2021). Evaluación del impacto de las aguas residuales de un beneficio de café en Xicotepec, Puebla [tesis de licenciatura]. Benemérita Universidad de Puebla.
 8. Hernández, I., Santiago, C., Limón, R. y López, V. (2021). Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Ingenierías*, 8(1), 60-66.
 9. Hernández, J. y Aranda, J. (2011). La biosíntesis de trehalosa en *Saccharomyces cerevisiae* aspectos generales y modelación metabólica. *BioTecnología*, 15(3), 19-34.
 10. Jiménez, R., Hernández, I., Regalado, C., Santos, J., Meas, Y., Wachter, M. y García, B. (2021). Innovative Control of Biofilms on Stainless Steel Surfaces Using Electrolyzed Water in the Dairy Industry. *Foods*, 10(1), 103.
 11. Larico, M. y Huaynacho, R. (2021). Diseño y construcción de un reactor de biopelícula adherida a carriers en lecho fluidizado con coagulación para la evaluación de su rendimiento en la remoción de DBO5 y DQO en aguas residuales domésticas del distrito de Mollendo-Islay [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
 12. Limón, R., López, V., Hernández, I., Aguilar, F., García, J. y Cano, M. (2021). Evaluación de la biodegradabilidad de agua residual procedente del proceso de beneficio húmedo del café. *Ciencia y Tecnología para el campo mexicano: Retos y oportunidades (1782-1791)*. México: INIFAP.
 13. Navia, P., Villada, S. y Mosquera, A. (2010). Las biopelículas en la industria de alimentos. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8(2), 118-128.
 14. Pérez, O., Alvarado, A., y Vallejo, N. (2017). Evaluación del desempeño de un reactor de biopelícula a escala piloto en el proceso de conversión de RSOM en bioenergéticos [Tesis doctoral]. Instituto Tecnológico de Orizaba.
 15. Rattan, S., Parande, A., Nagaraju, V., y Ghiwari, G. (2015). A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6461-6472.
 16. Sujatha, G., Shanthakumar, S., y Chiampho, F. (2020). UV light-irradiated photocatalytic degradation of coffee processing wastewater using TiO2 as a catalyst. *Environments*, 7(6), 47-54.
 17. Vázquez, G. (2016). Efectos del proceso de beneficio húmedo de café sobre la sostenibilidad hídrica de la microcuenca la Suiza, Chiapas [Tesis de licenciatura]. El Colegio de la Frontera Norte.
 18. Vichi, F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Espacio I+ D, innovación más desarrollo*, 4(7), 174-194.
 19. Villanueva, M., Bello, R., Wareham, D., Ruiz, E., y Maya, M. (2014). Discoloration and organic matter removal from coffee wastewater by electrochemical advanced oxidation processes. *Water, Air, y Soil Pollution*, 225(12), 1-11.
 20. Wickens, D.; Lynch, S.; West, G.; Kelly, P.; Verran, J.; Whitehead, K. (2014). Quantifying the pattern of microbial cell dispersion, density and clustering on surfaces of differing chemistries and topographies using multifractal analysis. *J. Microbiol*, 1(4), 101-108.