

Remediación fotocatalítica de vinazas de la industria mezcalera

Gines Palestino Ruby Sheila^{1*}, Montalvo Romero Carlos², Gines Palestino Sinuhé³,
Montalvo Salinas Daniel⁴, Sánchez Valeriano Nohemí⁵.

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz,
México

*ruby_gp@hotmail.com

²Universidad Autónoma del Carmen/Facultad de Química Ciudad del Carmen, Campeche,
México.

³Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

⁴Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Coatzacoalcos, Veracruz,
México.

⁵Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Querétaro, México

Resumen - Los líquidos residuales provenientes de la industria mezcalera, denominados vinazas provocan un serio cambio en el ecosistema cuando son descargadas en suelos o en mantos acuíferos, lo que se considera un grave problema ambiental por lo cual en este estudio se realizó la degradación de fenol y materia orgánica en vinazas de mezcal utilizando un fotorreactor de discos y como catalizador nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂). Como primer paso se llevó a efecto la caracterización fisicoquímica de las vinazas para determinar la concentración inicial de los contaminantes, los resultados obtenidos de la caracterización comprueban su elevada carga orgánica (DQOt de 103.17 g/L) y concentración de fenol (1573.076 mg/L). Después de la caracterización las vinazas se colocaron en el fotorreactor batch a 80 RPM durante 72 horas continuas utilizando dos diferentes concentraciones (altas al 100% y bajas al 10%). La degradación obtenida después de realizar el proceso fotocatalítico fue del 76.7% de fenol para concentraciones altas y de 81.26 para concentraciones bajas, durante el proceso de degradación se presentó la formación de compuestos intermedios como nitrofenoles e hidroxifenoles. La temperatura y el oxígeno disuelto se mantuvieron estables después de 30 horas, favoreciendo el proceso fotocatalítico. Durante esta investigación, se destacó la eficiencia del fotorreactor de discos para el tratamiento de residuos recalcitrantes, como las vinazas de mezcal.

Palabras clave: Catalizador, fenol, fotocatalisis, reactor, vinazas de mezcal.

Abstract: Waste liquids from the mezcal industry, known as vinazas, cause serious changes to the ecosystem when they are discharged into soil or aquifers, which is considered a serious environmental problem. Therefore,

this study investigated the degradation of phenol and organic matter in mezcal vinazas using a disc photoreactor and titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles as a catalyst. As a first step, the physicochemical characterization of the vinazas was carried out to determine the initial concentration of contaminants. The results obtained from the characterization confirm their high organic load (DQOt of 103.17 g/L) and phenol concentration (1573.076 mg/L). After characterization, the vinasses were placed in the batch photoreactor at 80 RPM for 72 continuous hours using two different concentrations (high at 100% and low at 10%). The degradation obtained after the photocatalytic process was 76.7% for phenol at high concentrations and 81.26% at low concentrations. During the degradation process, intermediate compounds such as nitrophenols and hydroxyphenols were formed. The temperature and dissolved oxygen remained stable after 30 hours, favoring the photocatalytic process. During this research, the efficiency of the disc photoreactor for treating recalcitrant waste, such as mezcal vinasses, was highlighted.

Keywords: Catalyst, phenol, photocatalyst, reactor, vinasses mezcal.

1. INTRODUCCIÓN

El mezcal es un destilado mexicano elaborado a partir del agave y es uno de los licores más representativos de México a nivel internacional con denominación de origen bajo la norma oficial mexicana NOM-070-SCFI-2016. Los principales estados productores son: Durango, Guerrero, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas y Oaxaca, siendo este último el mayor productor de mezcal. En Oaxaca, el mezcal se produce

principalmente en el municipio de Matatlán, conocido como la «capital mundial del mezcal», ubicado en el distrito de Tlacolula (Terán-Bustamante *et al.*, 2025). De acuerdo con el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, <https://comercam-dom.org.mx/>), la producción de mezcal en el año 2024 fue de 11,362,436 millones de litros, siendo Oaxaca el principal productor de mezcal aportando 90.70% del total de producción nacional.

El proceso del mezcal consta de cuatro etapas: cocción de los corazones de agave, molienda de los corazones cocidos, fermentación del jugo o mosto, y destilación/rectificación Figura 1. En esta última etapa es donde se generan las vinazas de mezcal (Robles-González *et al.*, 2012).

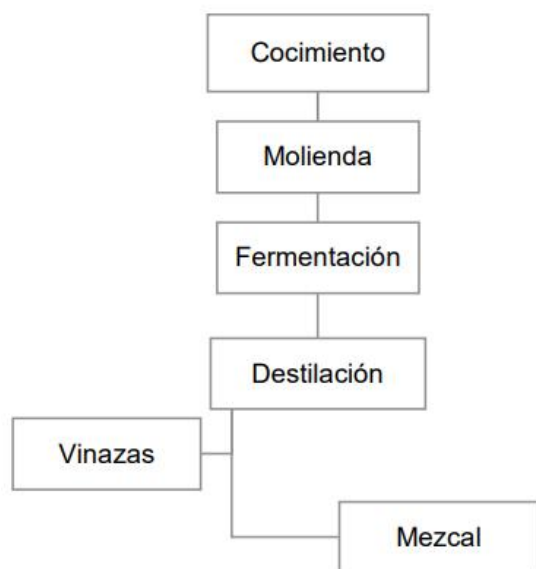


Figura 1. Proceso de producción de mezcal.

Las vinazas de mezcal representan un problema ambiental al tener un alto contenido de fenol pues muchas empresas mezcaleras vierten las vinazas a ríos o suelos aumentando la salinidad de los mantos acuíferos y reducción de la porosidad del suelo (Juárez-López *et al.*, 2025).

Diversas estrategias han sido empleadas para el tratamiento de vinazas, incluyendo procesos biológicos como digestión anaerobia, fermentación oscura, tratamiento fúngico y compostaje. No obstante, la presencia de compuestos fenólicos ha sido considerado como una limitante en procesos biológicos debido a las afectaciones que tiene sobre los microorganismos participantes en el proceso. En cuanto a tratamientos fisicoquímicos, la oxidación Fenton ha logrado remover hasta el 93 % de la DQO; sin embargo, los compuestos fenólicos persisten. La ozonización ha demostrado remover sustancias recalcitrantes y materia orgánica, sin embargo, es un tratamiento no redituable debido a los altos costos de operación (Robles-González *et al.*, 2012).

Por todo lo antes mencionado en esta investigación, se exploró la fotocatalisis heterogénea como una alternativa para la degradación de fenol y materia orgánica en vinazas de mezcal utilizando un reactor de discos y como catalizador dióxido de titanio (TiO_2).

2. MARCO CONCEPTUAL

La destilación es una de las operaciones principales de la producción de mezcal en la cual se generan las vinazas de mezcal como subproducto. Se estima que por cada litro de mezcal producido se generan de 8 a 14 litros. La composición de la vinaza de mezcal es variable, sin embargo, consiste principalmente de agua, sólidos disueltos, azúcares, compuestos no volátiles, compuestos fenólicos y polifenoles, además, son fuertemente ácidas (pH 4-5) y coloreadas (presencia de melanoidinas). Asimismo, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el oxígeno químico (DQO) se encuentran en un rango de 35 a 50 y de 100 a 150 g/L, respectivamente. Por lo tanto, las vinazas de mezcal han sido catalogadas como efluentes muy agresivos que pueden ocasionar graves problemas ambientales (Robles-González *et al.*, 2018).

El fenol es un compuesto aromático orgánico químicamente estable gracias a su anillo de benceno. Se ha catalogado como un contaminante de varias fuentes industriales que refleja un riesgo para sistemas acuáticos, además de su toxicidad aguda y crónica para la salud humana (Mumtaz *et al.*, 2024). Recientemente se han investigado tecnologías para el tratamiento de aguas que contienen fenol, tal es el caso de los procesos de oxidación avanzada (POA). Estos procesos han resultado en una opción viable debido a su versatilidad y capacidad para remover contaminantes no biodegradables y de alta estabilidad química. Los PAO se basan en procesos fisicoquímicos que inducen la descomposición, la simplificación de la estructura química de las moléculas orgánicas y finalmente la mineralización (Antonopoulou *et al.*, 2021).

La fotocatalisis heterogénea se ha empleado para el tratamiento de aguas residuales ya que tiene la capacidad de mejorar la oxidación de numerosos compuestos orgánicos (Mumtaz *et al.*, 2024) por lo que podría ser una opción prometedora para la remoción de compuestos presentes en las vinazas de mezcal como lo es el fenol. Existe una amplia variedad de fotocatalizadores; sin embargo, el catalizador más utilizado es el TiO_2 debido a su alta eficiencia y alto poder de oxidación, además de ser un material económico, fácil de sintetizar y muy estable químicamente y fotoquímicamente (Antonopoulou *et al.*, 2021).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea mediante nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en un fotorreactor de discos para la degradación de fenol y de materia orgánica contenidos en vinazas de mezcal provenientes de la región de Matatlán, Oaxaca.

3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar fisicoquímicamente las vinazas de mezcal determinando parámetros como pH, sólidos suspendidos totales y volátiles, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración inicial de fenol, con la finalidad de establecer el grado de contaminación del efluente.
2. Implementar un sistema de fotorreactor de discos a escala de planta piloto, operando en régimen batch a 80 RPM durante 72 horas continuas, para llevar a cabo el proceso de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 como catalizador.
3. Analizar la cinética de degradación del fenol mediante el seguimiento de su concentración a intervalos de tiempo específicos (0, 1, 2, 3, 5, 9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 65 y 72 horas), determinando el porcentaje de remoción alcanzado al final del tratamiento.
4. Analizar la degradación de la materia orgánica mediante el seguimiento de su concentración a intervalos de tiempo específicos (0, 1, 2, 3, 5, 9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 65 y 72 horas), determinando el porcentaje de degradación alcanzado al final del tratamiento.
5. Evaluar la influencia de parámetros operacionales, como la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, sobre la eficiencia del proceso fotocatalítico, estableciendo su correlación con la degradación de fenol.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente apartado se describen los materiales y métodos para la realización de esta investigación experimental cuantitativa, exploratoria. En la Figura 2 se describe la metodología seguida.

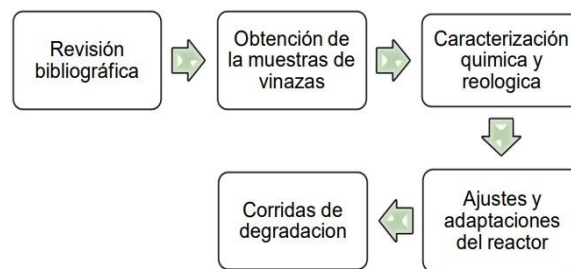


Figura 2. Metodología experimental

4.1 Materiales

Las vinazas fueron proporcionadas por una mezcalera de la región de Matatlán del estado de Oaxaca. Se utilizaron los siguientes reactivos grado analítico: Nanopartículas de Dioxido de Titanio Degussa p25 ($[\text{TiO}_2]$, Merck, $\geq 99,5\%$), Fenol Folin-ciocalteu (Hycl), para la preparación de soluciones se utilizó agua destilada ($[\text{H}_2\text{O}]$, Hycl).

4.2 Caracterización de las vinazas de mezcal

Las vinazas fueron tomadas de las descargas finales del proceso de la elaboración de mezcal, las muestras se recolectaron en frascos ámbar y se almacenaron a una temperatura de 4°C para evitar su fermentación y descomposición. Se realizó la caracterización fisicoquímica con el fin de determinar la composición de las vinazas para su posterior tratamiento. El pH se midió por medio de un potenciómetro, el contenido de sólidos suspendidos totales y volátiles se determinó de acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2001, mientras que la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó mediante la técnica descrita en la NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Finalmente, la concentración de fenol se determinó mediante colorimetría con el reactivo de Folin-Ciocalteu.

4.3 Corridas de degradación de fenol

Se realizaron 2 corridas experimentales para degradar fenol a altas y bajas concentraciones, con el fin de evaluar el comportamiento del catalizador: vinazas sin dilución, directamente de la última descarga del proceso, y vinazas diluidas en agua al 10%. Para llevar a cabo la degradación, se colocaron 4 litros de vinazas en el fotorreactor de discos mostrado en la Figura 3.

La reacción se llevó a cabo durante 72 horas continuas a 80 RPM. Se tomaron muestras a las 0, 1, 2, 3, 5, 9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 65 y 72 h de reacción para dar seguimiento a la remoción de fenol (%), temperatura ($^\circ\text{C}$), oxígeno disuelto (mg/L) y al comportamiento reológico, con la finalidad de seguir el comportamiento fenomenológico de las vinazas de mezcal durante el proceso fotocatalítico (Gines-Palestino *et al.*, 2020).

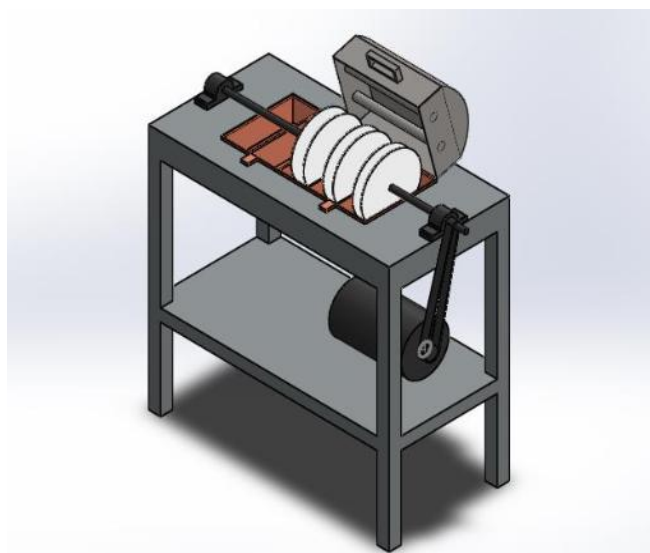


Fig. 3. Esquema del fotoreactor de discos

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se presentan los resultados de la investigación experimental, desde la caracterización de las vinazas de mezcal hasta la remoción de fenol.

5.1 Resultados de la caracterización

Las vinazas presentan un pH ácido (4.07), lo cual es favorable para los procesos fotocatalíticos, ya que se ha determinado que favorece una mayor degradación de los compuestos fenólicos (Montalvo *et al.*, 2022). Asimismo, los contenidos de sólidos suspendidos totales y volátiles obtenidos fueron de 29.155 g/L y 27.398 g/L, respectivamente. La concentración total de DQO resultó en 103.17 g/L. De acuerdo con el contenido total de DQO presente, las vinazas pueden ser catalogadas como un residuo con alto potencial de contaminación, pues rebasan los límites máximos permisibles de DQO (0.32 g/L) (Ley de Aguas, 2016). De igual forma, se corrobora el potencial contaminante mediante la concentración de fenol presente en las vinazas, la cual fue de 1573.076 mg/L, concentración que supera el límite máximo permisible de fenol en la descarga de aguas residuales (0.75 mg/L) (Gines-Palestino *et al.*, 2020).

5.2 Resultados de la degradación de fenol en las vinazas de mezcal (100%-80 rpm)

En la Figura 3 se puede observar la corrida de degradación de fenol con las vinazas tomadas directamente de la última etapa del proceso de la elaboración de mezcal sin dilución alguna, podemos apreciar que existe una disminución de la concentración de fenol durante las primeras 10 h, posteriormente aumenta la concentración ocasionada por la formación de compuestos intermedios (nitrofenoles e hidroxifenoles como hidroquinona y hesorcinol) (Gines-Palestino *et al.*, 2020), el porcentaje de remoción fue de 76.7% después de 72 h.

En la Figura 4 se observa la influencia de la temperatura con respecto al oxígeno disuelto, es decir a menor temperatura mayor cantidad de oxígeno disuelto se encuentra presente en el seno de la reacción

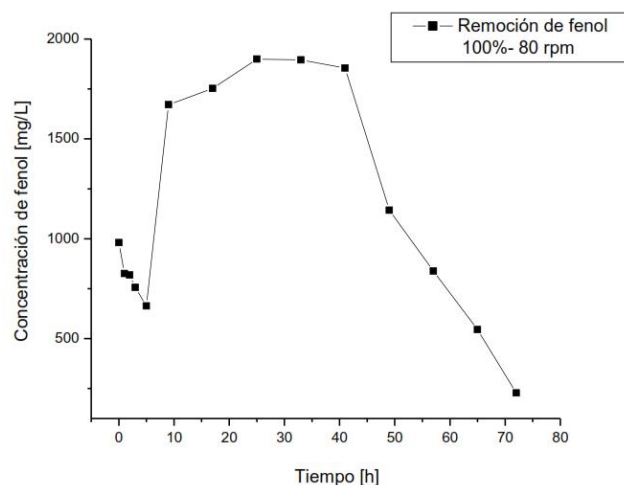


Figura 4. Remoción de fenol en función del tiempo

En la Figura 5 se observa un aumento de temperatura durante las primeras horas del proceso fotocatalítico, después de las 30 horas la temperatura se logró mantener constante al igual que la cantidad de oxígeno disuelto lo cual favoreció la remoción de fenol en las vinazas de mezcal.

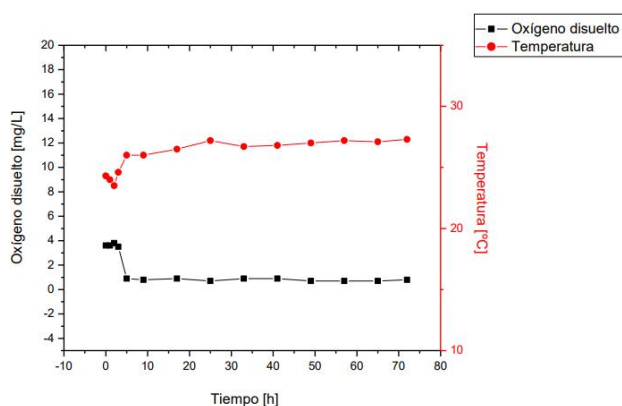


Figura 5. Relación entre oxígeno disuelto y temperatura (100%-80 rpm)

5.3 Resultados de la degradación de fenol en las vinazas de mezcal (10%-80 rpm)

La Figura 6 muestra el comportamiento de la concentración de fenol durante la corrida de remoción bajo las condiciones de operación de 10% - 80 rpm. Se puede observar que, al igual que en la corrida anterior, durante las primeras 30 horas de operación aumentó la concentración de fenol; esto se debe a la presencia de compuestos intermedios, que siguen el mismo comportamiento de remoción que el reportado por otros autores.

Durante las siguientes horas del proceso fotocatalítico, se observó una rápida disminución de la concentración de fenol, debido al mecanismo de oxidación favorecido por el radical hidroxilo generado por la reacción entre la capa de TiO_2 y el agua del medio, con la activación del fotocatalizador por la radiación UV. El porcentaje de remoción obtenido fue de 81.26 % superando el porcentaje de remoción obtenido bajo las condiciones de operación de 100%- 80 rpm.

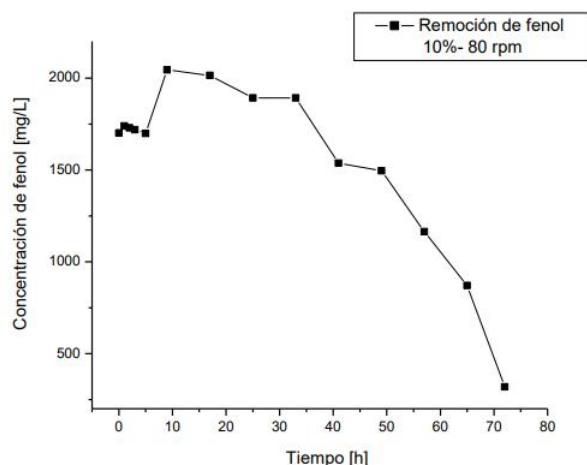


Figura 6. Remoción de fenol en función del tiempo (10%-80%)

En la Figura 7 se observa un aumento de temperatura durante las últimas horas del proceso fotocatalítico lo cual no influye en los los porcentajes de remoción siendo el oxígeno disuelto el reactivo limitante para que se lleve a cabo dicho proceso.

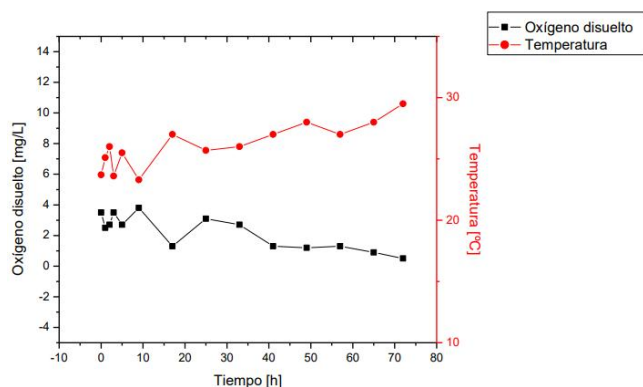


Figura 7. Relación entre oxígeno disuelto y temperatura (10%-80 rpm)

5.4 Análisis de la remoción de materia orgánica 100% - 80

La Figura 8 muestra el comportamiento de remoción de materia orgánica, se puede observar un ligero aumento de DQO_T después de las primeras 10 horas de remoción, la curva retoma su decaimiento después de las 30 horas de operación, el porcentaje de remoción obtenido a las 72 horas de operación fue de 77.24%.

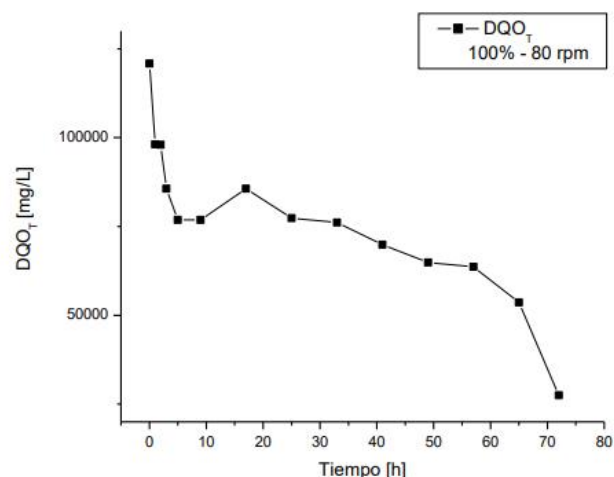


Figura 8. Remoción de materia orgánica en función del tiempo (100%- 80 rpm)

5.5 Análisis de la remoción de materia orgánica 10% - 80 rpm

En la Figura 9 se observa el comportamiento de remoción de materia orgánica bajo las condiciones de operación 10%-80 rpm. Se observa una tendencia de decaimiento en la disminución de la carga orgánica, la cual coincide con el comportamiento de la curva de remoción de fenol correspondiente a las Figuras 4 y 6. El porcentaje de remoción de materia orgánica alcanzado después de las 72 horas de operación fue de 83.72%.

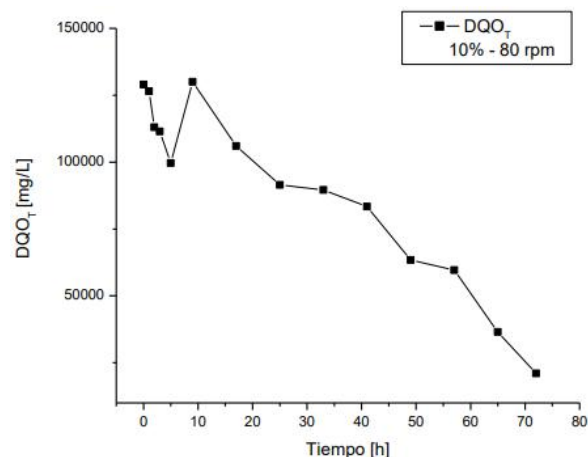


Figura 9. Remoción de materia orgánica en función del tiempo (10%- 80 rpm)

6. CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la fotocatalisis heterogénea, utilizando como catalizador nanopartículas de TiO_2 en un fotorreactor de discos, constituye una alternativa eficiente para el tratamiento de vinazas provenientes de la industria mezcalera, caracterizadas por su alta carga orgánica y elevada concentración de compuestos fenólicos. La caracterización fisicoquímica inicial confirmó el alto potencial contaminante de este

residuo, al obtener valores elevados de DQO (103.17 g/L) y concentración de fenol (1573.076 mg/L), los cuales superan los límites permisibles establecidos para descargas de aguas residuales industriales.

Los resultados experimentales mostraron que el proceso fotocatalítico permitió alcanzar remociones significativas de fenol, con valores de 76.7 % para vinazas sin dilución y 81.26 % para vinazas diluidas al 10 %, así como porcentajes de reducción de materia orgánica de hasta 83.72 %. Estos resultados evidencian que la dilución del efluente favorece la eficiencia del proceso, probablemente debido a una mayor disponibilidad de especies reactivas y a una menor interferencia de compuestos orgánicos complejos en la superficie del catalizador.

Asimismo, se observó que la estabilidad de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, influyen directamente en el desempeño del sistema fotocatalítico. Durante el proceso, también se detectó la formación de compuestos intermedios derivados de la oxidación parcial del fenol. En conjunto, los resultados obtenidos confirman el potencial del TiO₂ soportado en los discos del fotorreactor como tecnología prometedora para el tratamiento de efluentes recalcitrantes generados por la industria mezcalera.

No obstante, para incrementar la eficiencia del proceso y lograr una mineralización más completa de los contaminantes, en trabajos futuros se realizará el dopaje del catalizador, así como su integración con otros procesos de oxidación avanzada, a fin de minimizar la formación de subproductos intermedios y facilitar su aplicación a escala industrial.

REFERENCIAS

1. Antonopoulou, M., Kosma, C., Albanis, T., & Konstantinou, I. (2021). An overview of homogeneous and heterogeneous photocatalysis applications for the removal of pharmaceutical compounds from real or synthetic hospital wastewaters under lab or pilot scale. *Science of The Total Environment*, 765, 144163. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144163>.
2. Gines-Palestino, R., Oropeza-De la Rosa, E., Montalvo-Romero, C., & Cantú-Lozano, D. (2020). Rheokinetic and effectiveness during the phenol removal in mescal vinasses with a rotary disks photocatalytic reactor (RDPR). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 639-652.
3. Juárez-López, C. R., Caballero-Caballero, M., Chiñas-Castillo, F., Alavéz-Ramírez, R., Bernabe, J. L. M., Güereca-Hernández, L. P., & Rivera-Huerta, A. (2025). Environmental impact of mezcal production: assessing bagasse valorization and vinasse treatment for a circular economy approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02496-x>.
4. Ley de Aguas. (2016). Nacionales y su Reglamento.
5. Montalvo, C., Gines, R. S., Cantu, D., Ruiz, A., Aguilar, C. A., Perez, I., & Ceron, R. M. (2022). Fluidized bed photoreactor for the removal of acetaminophen and pyridine using Al-doped TiO₂ supported on alumina. *Iranian Journal of Catalysis*, 12(3).
6. Mumtaz, F., Li, B., Al Shehchia, M. R., Feng, X., & Wang, K. (2024). Treatment of phenolic-wastewater by hybrid technologies: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104695. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.104695>
7. Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524-546. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2011.09.006>
8. Robles-González, V., Poggi-Varaldo, H. M., Galíndez-Mayer, J., & Ruiz-Ordaz, N. (2018). Combined Treatment of Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge. *Water Environment Research*, 90(11), 1985-1996. <https://doi.org/10.2175/106143017x15054988926433>
9. Terán-Bustamante, A., Leyva-Hernández, S. N., & Martínez-Velasco, A. (2025). Knowledge and innovation management model in the mezcal industry in Mexico. *Heliyon*, 11(3), e42032. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2025.E42032>