Biocoagulante de cáscara de tuna: Una alternativa para remover contaminantes en las vinazas de mezcal

José Andrés González-López[1], Luisa Helena Salgado-Román[1], Miguel Mauricio Aguilera-Flores[1*]
Juan Manuel Vigueras-Cortés[2], Verónica Ávila-Vázquez[1], Alan Yael Zúñiga-Montoya[1]

[1]*Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Ingeniería Ambiental. Calle Circuito Cerro del Gato No. 202, Col. Ciudad Administrativa, Zacatecas, Zac. C.P. 98160.*
[2]*Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, Academia de Ciencias Ambientales. Calle Sigma No. 119, Col. 20 de noviembre II, Durango, Dgo. C.P. 34220.*

Artículo recibido 01 de octubre de 2024 y aceptado el 8 de mayo de 2025

Prickly pear peel biocoagulant: An alternative for removing contaminants from mezcal vinasses

Abstract

This paper focuses on the utilization of prickly pear peel, a waste generated in various States of Mexico, to produce a biocoagulant that could replace the use of chemical coagulants (iron and aluminum salts) in the treatment of different wastewater. Therefore, this project aimed to evaluate the potential of a biocoagulant based on prickly pear peel to remove contaminants from mezcal vinasses. The biocoagulant potential was determined using a jar test and a central composite experimental design, which was analyzed with Design Expert 7.0 software (trial version). The experimental design included pH factors ranging from 4 to 10 and doses varying from 10 to 800 mg/L, with turbidity and chemical oxygen demand (COD) removal efficiencies as the responses. Mezcal vinasses pH was acidic (4.03 ±0.01). However, the optimal working conditions in the coagulation-flocculation process were determined with biocoagulant doses of 360 mg/L and 684.31 mg/L at a pH of 9.12, achieving turbidity and COD removal efficiencies of 79.3% and 40.8%, respectively.

Key words: Coagulation-flocculation, COD, removal efficiency, turbidity.

Resumen

Este trabajo se centra en el aprovechamiento de la cáscara de tuna, un residuo generado en diversos estados de México, y en la producción de un biocoagulante que pudiera sustituir el uso de coagulantes químicos (sales de hierro y aluminio) en el tratamiento de diferentes aguas residuales. Por lo tanto, este proyecto tuvo como objetivo evaluar el potencial de un biocoagulante a base de cáscara de tuna para remover contaminantes de las vinazas de mezcal. El potencial biocoagulante se determinó mediante una prueba de jarras y un diseño experimental central compuesto usando el software Design Expert 7.0, con factores de pH de 4 a 10 y dosis de 10 a 800 mg/L, midiendo las eficiencias de remoción de turbidez y demanda química de oxígeno (DQO). El pH de las vinazas de mezcal fue ácido (4.03 ±0.01). Sin embargo, las condiciones óptimas de trabajo en el proceso de coagulación-floculación se determinaron con dosis de biocoagulante de 360 mg/L y 684.31 mg/L a un pH de 9.12 para lograr eficiencias de remoción de turbidez y DQO del 79.3 % y 40.8 %, respectivamente.

Palabras claves: Coagulación-floculación, DQO, eficiencia de remoción, turbidez.

*Autor de correspondencia
Email: maguileraf@ipn.mx
ISSN 2594-0384 (Electrónica)

Introducción

En México, cinco entidades federativas cuentan con la Denominación de Origen Mezcal (DOM): Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas (IMPI, 2012). A las aguas residuales generadas durante la elaboración del mezcal se le denomina vinazas. Cada año, se vierten entre 45 y 54 millones de litros de vinazas al ambiente, las cuales son residuos recalcitrantes con pH ácido, alta carga orgánica y elementos disueltos (Zelaya-Benavidez *et al*., 2021).

En el tratamiento de las aguas residuales provenientes de las vinazas del mezcal, se utiliza el proceso de coagulación-floculación, también conocido como prueba de jarras. Este proceso consiste en un tratamiento químico que remueve partículas y iones metálicos del agua residual mediante el uso de coagulantes. Los coagulantes comerciales, compuestos por productos químicos, se emplean para remover sólidos, suavizar y clarificar el agua, espesar los lodos y deshidratar los sólidos. Durante la coagulación, se forma una masa gelatinosa que atrapa y agrupa las partículas, facilitando su posterior filtración. En la etapa de floculación, estas partículas se agitan y se unen en conglomerados mayores, lo que permite su sedimentación más eficiente (Pochteca, 2022).

No obstante, el uso de coagulantes químicos puede tener efectos negativos tanto para el ambiente como para la salud humana, ya que su presencia en el agua tratada o lodos genera problemas de ecotoxicidad ya que al no poder ser degradados pueden permanecer por varias semanas o meses en el ambiente, representando un riesgo de toxicidad para la vida acuática (Suman *et al.*, 2018). Ante esto, los biocoagulantes derivados de plantas y microorganismos se presentan como una alternativa viable. Estos biocoagulantes contienen bioactivos como proteínas, polisacáridos, mucílagos, taninos y alcaloides, los cuales tienen la capacidad de remover contaminantes del agua, además de generar lodos menos tóxicos en comparación con los coagulantes químicos (Banchón, 2016).

En esta investigación, se emplearon residuos de cáscara de tuna para producir biocoagulante, ya que estos materiales se caracterizan por ser biodegradables y no tóxicos (Kurniawan *et al.*, 2023). La tuna es una fuente rica en fibra, hidrocoloides como mucílagos, betalaínas, carotenoides, además de minerales como calcio y potasio, y vitamina C (Olivero-Verbel *et al.*, 2014). La valorización de estos residuos no solo ofrece beneficios sociales, económicos y ambientales, sino que también tiene el potencial de ser una solución sostenible para el tratamiento de las vinazas de mezcal.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de un biocoagulante a base de cáscara de tuna para remover turbidez y DQO de las vinazas de mezcal a partir de su tratamiento basado en un proceso de coagulación-floculación.

Materiales y métodos

Obtención del biocoagulante

Se seleccionaron cáscaras de tuna fresca de la variedad conocida como "*roja pelona"*, las cuales fueron provistas por un mercader en el Mercado de Fresnillo, Zacatecas, México. Se recolectaron aproximadamente 3 kg de cáscara de tuna (*Opuntia robusta* "roja pelona"). El biocoagulante fue obtenido a partir de la extracción del mucílago de la cáscara de tuna, acorde a la metodología descrita por Aguilera-Flores *et al*. (2024). La técnica consistió en que la cáscara de tuna fue cortada y lavada con agua de grifo. Posteriormente, se sumergió en agua desionizada en una relación 1:1 (p/v) durante 48 h. Transcurrido ese tiempo, las cáscaras se trituraron en una licuadora comercial junto con el agua desionizada. La mezcla resultante se sometió a un tratamiento térmico a 50°C ± 5°C durante 1 h, utilizando una parrilla de calentamiento con agitación magnética. La mezcla se dejó reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente.

La suspensión se centrifugó a 3,500 rpm durante 15 min, y el sobrenadante fue decantado. El volumen decantado fue recolectado en un vaso de precipitados y medido en una probeta graduada. Se utilizó etanol como disolvente para la síntesis del biocoagulante en proporción 1:3 (v/v). La mezcla se dejó reposar durante 24 h en refrigeración a 4°C. Después del reposo, la mezcla fue filtrada al vacío y el sólido obtenido se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 h. El mucílago, que corresponde al sólido seco obtenido, se trituró en un mortero hasta obtener un polvo fino (biocoagulante), que se almacenó en un frasco de vidrio en refrigeración a 4°C hasta su uso.

Muestreo y caracterización de las vinazas de mezcal

Se recolectaron 25 L de muestra de vinazas crudas en el punto de descarga de una mezcalera ubicada en Nombre de Dios, Durango, México. La toma de muestra, el transporte, y la preservación se hizo siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-003-1998 (SCFI, 1980).

Se realizó la caracterización fisicoquímica de las vinazas de mezcal, tanto antes como después del ensayo de jarras. Los parámetros medidos incluyeron: pH, siguiendo la NMX-AA-008-SCFI-2016 (SE, 2016); conductividad eléctrica de acuerdo con la NMX-AA-093-SCFI-2018 (SE, 2018); turbidez según la NMX-AA-038-SCFI-2001 (SE, 2001); y DQO conforme a la NMX-AA-030/1-SCFI-2012 (SE, 2013).

Diseño experimental y prueba de jarras

El diseño experimental fue realizado mediante el software Design Expert 7.0, considerando dos variables: pH de las vinazas y dosis de biocoagulante. El rango de pH fue evaluado de 4 a 10, y dosis de biocoagulante de 10 a 800 mg/L. Asimismo, se consideraron 5 puntos centrales, que corresponden a experimentos adicionales en el centro matemático de dos variables continuas (valores promedio en el rango de cada variable estudiada), y los experimentos se hicieron en un solo bloque. Se analizaron como respuestas las eficiencias de remoción de turbidez y DQO en las vinazas (%). El diseño experimental arrojó 13 experimentos con variaciones de pH y dosis al azar, los cuales fueron realizados en la prueba de jarras de forma aleatoria para reducir el sesgo en la experimentación y obtención de datos.

Las pruebas de jarras consistieron en 1 L de agua para cada ensayo, ajustando el pH con soluciones de NaOH 1 M y ácido sulfúrico 1 M, según el caso. Se añadió la dosis correspondiente de biocoagulante a analizar y se agitó la mezcla a 150 rpm durante 2 min. Se agregó 1 mL de un floculante comercial a una concentración de 1 ppm, y las muestras se agitaron nuevamente a 50 rpm durante 20 min. Después del tiempo de agitación, las muestras se dejaron reposar por 1 h para permitir la sedimentación de los flóculos. Finalmente, se tomaron 30 mL de muestra del sobrenadante para realizar la caracterización fisicoquímica de las vinazas tratadas con respecto a la turbidez y la DQO.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza ANOVA con los datos experimentales, los cuales se ajustaron a modelos matemáticos. Este análisis permitió obtener una ecuación representativa de las respuestas (eficiencias de remoción de turbidez y DQO), que facilitó la optimización de las condiciones de operación, determinando la dosis y el pH óptimos.

Resultados y discusión

Biocoagulante

Se obtuvieron 11.5 g de biocoagulante a partir de los 3 kg de cáscara de tuna procesados. Por lo tanto, el rendimiento fue del 0.38%. La figura 1 muestra una imagen de la cáscara de tuna de *Opuntia robusta* "roja pelona" y del biocoagulante producio.

Características fisicoquímicas de las vinazas de mezcal

La tabla 1 muestra las características fisicoquímicas de las vinazas de mezcal antes de someterse al tratamiento de coagulación-floculación, reportándose el valor promedio de tres mediciones realizadas a la muestra de las vinazas.

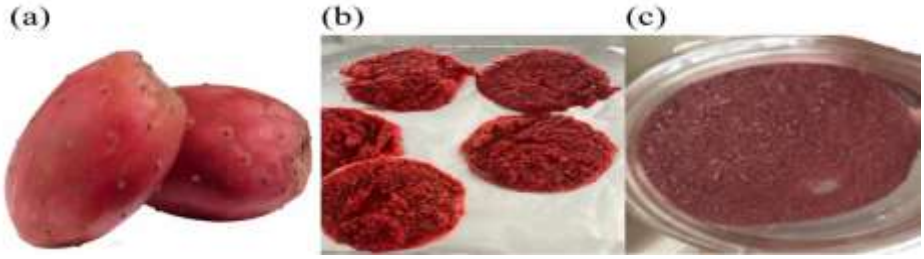


Figura 1. (a) Cáscara de tuna de *Opuntia robusta* "roja pelona", (b) biocoagulante húmedo, (c) biocoagulante seco.

Tabla 1. Características fisicoquímicas de las vinazas crudas de mezcal.

Característica fisicoquímica	Valor	Desviación estándar	Unidad
pH	4.03	± 0.01	-
CE	14.06	± 0.15	µS/cm
Turbidez	1,728.30	± 2.01	NTU
DQO	3,171.80	± 4.55	mg/L

*CE = Conductividad eléctrica, DQO = Demanda química de oxígeno

La descarga de aguas residuales en cuerpos de agua y bienes nacionales en México se regula conforme a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022), que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua regulados. El pH debe estar en un rango de 6-9 para poder ser descargada, el cual está fuera de norma con respecto al valor obtenido en la Tabla 1. Por lo tanto, debe ajustarse antes de ser descargada. La conductividad eléctrica no representa un problema de contaminación ya que la norma oficial mexicana solo menciona que cuando se obtiene un valor menor a 3,500 µS/cm (como en este caso), debe analizarse y reportar E. *coli*.

Asimismo, la DQO no debe superar los 150 mg/L en ríos, arroyos, canales, drenes, y suelo (SEMARNAT, 2022), valor que es superado 21 veces en las vinazas de mezcal (Tabla 1), lo que obliga a ser tratada antes de su descarga. La normatividad mexicana no establece un límite de turbidez para la descarga de un agua residual, únicamente lo establece para agua de uso y consumo humano. No obstante, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la turbidez para cualquier uso del agua no debe superar los 5 NTU (World Health Organization, 2017), de modo que este valor es superado 346 veces en las vinazas de mezcal (Tabla 1). Entonces, las vinazas de mezcal requieren ser tratadas previo a su descarga. Es por ello por lo que en el presente trabajo se propone el proceso de coagulación-floculación para tratar estas aguas residuales en relación con los parámetros fisicoquímicos analizados y que superan los límites establecidos de la norma. Por esta razón, se optó por analizar las eficiencias de remoción de DQO y turbidez como respuestas en el ensayo de jarras y diseño experimental.

Eficiencias de remoción de turbidez y DQO

La tabla 2 muestra las eficiencias de remoción de turbidez y DQO obtenidos en cada ensayo de jarras conforme al diseño experimental. El valor reportado es el que se obtuvo en cada ensayo, ya que fue realizado una sola vez.

Las eficiencias de remoción de turbidez variaron entre 36.35% y 80.29%, y las de DQO entre 0.00% y 50.30%. Estos resultados experimentales se ajustaron a los modelos matemáticos mostrados en las ecuaciones (1) y (2).

$$ER\ de\ Turbidez\ (\%) = 1.46707 + 8.5330 * pH \quad Ec.\ (1)$$

$$ER\ de\ DQO\ (\%) = 26.28910 - 0.11499 * Dosis - 4.30612 * pH + 0.021224 * Dosis * pH \quad Ec.\ (2)$$

Puede observarse que la eficiencia de remoción de turbidez quedó representada a través de un modelo lineal, con un valor de $p < 0.0001$ para el modelo y $p > 0.7124$ para la falta de ajuste en el análisis de varianza ANOVA. En cambio, la eficiencia de remoción de DQO quedó representada por un modelo cuadrático, con un valor de $p < 0.0004$ para el modelo y $p > 0.1298$ para la falta de ajuste. Al establecer un valor de $p < 0.05$ con un nivel de confianza del 95%. Se define que ambos modelos matemáticos son significativos al tener valores de $p < 0.05$, y el ajuste de los datos a otro modelo no es requerido, ya que la falta de ajuste no fue significativa (valores de $p > 0.05$), en ambos modelos.

A partir de estos modelos matemáticos, se determinaron las condiciones óptimas que se muestran en la tabla 3.

Cabe destacar que un pH alcalino funciona mejor

Tabla 2. Eficiencias de remoción de turbidez y DQO en las vinazas de mezcal después del tratamiento de coagulación-floculación empleando el biocoagulante de cáscara de tuna.

Ensayo	Dosis (mg/L)	pH	Remoción de turbidez (%)	Remoción de DQO (%)
1	125.69	4.88	65.67	3.58
2	684.31	4.88	80.29	50.30
3	125.69	9.12	67.37	6.74
4	684.31	9.12	70.01	0.00
5	10.00	7.00	75.64	0.00
6	800.00	7.00	69.92	7.16
7	405.00	4.00	36.35	0.00
8	405.00	10.00	54.56	7.30
9	405.00	7.00	36.35	0.00
10	405.00	7.00	79.89	17.62
11	405.00	7.00	64.90	21.06
12	405.00	7.00	58.24	11.17
13	405.00	7.00	36.35	1.71

Tabla 3. Condiciones óptimas de pH y dosis en el proceso de coagulación-floculación de las vinazas de mezcal.

Parámetro	Dosis de biocoagulante (mg/L)	pH de las vinazas	Eficiencia de remoción (%)
Turbidez	360.54	9.12	79.30
DQO	684.31	9.12	40.80

para la coagulación-floculación debido a la neutralización de cargas, cuando el pH de las vinazas de mezcal es ajustado a uno alcalino. Las cargas negativas pueden neutralizar las cargas positivas del coagulante, promoviendo la formación de flóculos. Así, los flóculos pueden conformarse, siendo más grandes y densos, facilitando la sedimentación y remoción de partículas coloidales o suspendidas (Sharghi y Davarpanah, 2022). A pesar de tener una remoción de turbidez del 79.3%, no se logra estar debajo del límite máximo permisible (< 5 NTU), establecido por la World Health Organization (2017). Lo mismo ocurrió con la DQO. Por lo tanto, el proceso de coagulación-floculación en las vinazas de mezcal debe ser complementario a otros procesos de tratamiento. Sin embargo, su aplicación reduce la concentración de estos dos contaminantes (turbidez y DQO), y favorece a que su ingreso a un tratamiento posterior basado en reactores biológicos sea más eficiente, al tener una menor carga orgánica.

Por otro lado, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece un rango permisible de pH del agua residual de 6-9 para ser descargada en cuerpos receptores propiedad de la nación (SEMARNAT, 2022). Al alcalinizar el pH de las vinazas a 9.12, este valor rebasaría el límite superior permisible 1.01 veces, por lo que tendría que ser ligeramente acidificada, después del tratamiento, para estar dentro del rango permisible (6-9). Se ha reportado que es más barato acidificar o alcalinizar las aguas residuales que utilizar grandes dosis de agentes coagulantes (Aguilera-Flores *et al.*, 2024; (Sharghi y Davarpanah, 2022). Por lo tanto, algunas investigaciones sugieren que podría ser más costeable alcalinizar el pH de las vinazas a 9.12, y después del tratamiento coagulación-floculación, monitorear el pH, y si supera el rango permisible (6-9), acidificarlo ligeramente para estar dentro de los límites permisibles de la norma mexicana. Esta acción podría ser más económica al utilizar la dosis óptima de biocoagulante, que una cantidad mayor.

Zurita *et al*. (2024), reportaron la aplicación de un biocoagulante producido a partir de semillas de *Moringa oleifera* para tratar las vinazas de mezcal por un proceso de coagulación-floculación. Ellos reportaron una remoción de turbidez del 43%, usando una dosis de biocoagulante de 1,000 mg/L y un pH de las vinazas de 8. Con base en los resultados reportados en tabla 3, se puede apreciar que el biocoagulante de cáscara de tuna muestra una mayor eficiencia (1.8 veces más alto), en la remoción de turbidez que el biocoagulante a base de *Moringa oleifera*, además se requiere una dosis 2.7 veces menor (360.54 mg/L), que la empleada por Zurita *et al.* (2024).

El uso de chitosán como biopolímero también ha sido explorado para el mismo fin, logrando remover el 83% de la DQO de las vinazas de mezcal con dosis de 125.4 mg/L (Ferral-Pérez *et al*., 2016). Otros tipos de coagulantes como el ácido poli-γ-glutámico, donde una dosis de 300 mg/L permitió la remoción de 70% de la turbidez y 79.5% de la DQO en vinazas de mezcal (Carvajal-Zarrabal *et al*., 2011); y el uso de cloruro férrico combinado con mucílago del nopal, donde se logró una remoción de turbidez del 17% y de DQO del 84% con una dosis de 1,000 mg/L (Mejía-Rivas *et al.*, 2021), también han sido examinados. No obstante, al comparar los resultados del presente trabajo con otros reportados en la literatura, se resalta que el biocoagulante a base de cáscara de tuna se potencia como un material alternativo y eficiente para aplicarlo en el tratamiento de las vinazas de mezcal mediante un proceso de coagulación-floculación.

Conclusiones

Se logró producir un biocogulante a base de cáscaras de tuna “roja pelona”. El pH de las vinazas de mezcal resultó ser ácido (4.03). Se recomienda ajustar el pH a uno alcalino (9.12), para lograr mayores eficiencias de remoción de turbidez y DQO, ya que se determinaron las condiciones óptimas de operación en el proceso de coagulación-floculación definiendo que con dosis de biocoagulante de 360 mg/L y 684.31 mg/L a un pH de 9.12, se logran eficiencias de remoción de turbidez y DQO de 79.3% y 40.8%, respectivamente, empleando el biocoagulante a base cáscara de tuna. Por lo tanto, el biocoagulante a base de cáscara de tuna se potencia como una alternativa factible para sustituir el uso de coagulantes químicos.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la mezcalera de Nombre de Dios, Durango, por las facilidades para realizar el muestreo de las vinazas de mezcal. Asimismo, al mercader que nos proveyó de las cáscaras de tuna.

Referencias

Aguilera-Flores, M.M., Robles-Miranda, O.E., Medellín-Castillo, N.A., Ávila-Vázquez, V., Sánchez-Mata, O., Vázquez-Bañuelos, R., Chávez-Murillo, C.E. 2024. "Evaluation of the Potential of a Biocoagulant Produced from Prickly Pear Peel Waste Valorization for Wastewater Treatment." *Water*, 16:1444. ISSN: 2073-4441, DOI: 10.3390/w16101444.

Banchón, C., Baquerizo, R., Muñoz, D., Zambrano, L. 2016. "Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales". *Enfoque UTE*, 7(4): 111-126. ISSN 1390-9363, DOI: 10.29019/enfoqueute.v7n4.118.

Carvajal-Zarrabal, O., Nolasco-Hipólito, C., Barradas-Dermitz, D.M., Hayward-Jones, P.M., Aguilar-Uscanga, M.G., Bujang, K. 2011. "Treatment of vinasse from tequila production using polyglutamic acid." *Journal of Environmental Management*, 95: S66-S70. ISSN: 1095-8630, DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.05.001.

Ferral-Pérez, H., Torres-Bustillos, L.G., Méndez, H., Rodríguez-Santillan, J.L., Chairez, I. 2016. "Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation". *Ozone: Science & Engineering*, 38(4): 279-290. ISSN: 1547-6545, DOI: 10.1080/01919512.2016.1158635.

IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial). 2012. *Modificación a la Declaración General de Protección de la Denominación de Origen Mezcal*. Secretaría de Gobernación de México, Available: https://www.gob.mx/impi/acciones-y-programas/declaraciones-generales-de-proteccion-de-denominaciones-de-origen [Consulted: Septiembre 22, 2024].

Kurniawan, S.B., Ahmad, A., Said, N.S.M., Gustinasari, K., Abdullah, S.R.S., Imron, M.F. 2023. "The influence of preparation and pretreatment on the physicochemical properties and performance of plant-based biocoagulants in treating wastewater". *Environmental Advances*, 14: 100441. ISSN: 2666-7657, DOI: 10.1016/j.envadv.2023.100441.

Mejía-Rivas, C.A., Bailón-Salas, A.M., De la Peña-Arellano, L.A., Rodríguez-Rosales, M.D.J., Ordaz-Díaz, L.A. 2021. "Evaluation of *Opuntia ficus-indica* potential as a natural coadjuvant for vinasse treatment". *BioResources*, 16(3): 6031-6056. ISSN: 1930-2126, DOI: 10.15376/biores.16.3.6031-6056.

Olivero-Verbel, R.E., Aguas-Mendoza, Y.R., Mercado-Martínez, I.V., Casas-Camargo, D.P., Montes-Gazabón, L.E. 2014. "Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas". *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1): 70-75. ISSN: 1794-4953, DOI: 10.18041/1794-4953/avances.1.302.

Pochteca. 2022. *¿Qué son los coagulantes y qué tipos existen?* Pochteca Web, Available: https://mexico.pochteca.net/que-son-los-coagulantes-y-que-tipos-existen/ [Consulted: Septiembre 29, 2024].

SCFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). 1980. *NMX-AA-003-1980, Aguas residuales. - Muestreo*. Dirección General de Normas, Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf> , [Consulted: marzo 04, 2024].

SE (Secretaría de Economía). 2001. *NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de agua. - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba*. Dirección General de Normas, Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf>, [Consulted: marzo 04, 2024].

SE (Secretaría de Economía). 2013. *NMX-AA-030/1-SCFI-2012, Análisis de agua - medición de la Demanda Química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba - parte 1 - método de reflujo abierto*. Dirección General de Normas, Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166774/NMX-AA-030-1-SCFI-2012.pdf>, [Consulted: marzo 04, 2024].

SE (Secretaría de Economía). 2016. *NMX-AA-008-SCFI-2016, Análisis de agua. Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba*. Dirección General de Normas, Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>, [Consulted: marzo 04, 2024].

SE (Secretaría de Economía) 2018. *NMX-AA-093-SCFI-2018, Análisis de agua. - Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Dirección General de Normas, Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/AA093-2018_06.pdf>, [Consulted: marzo 04, 2024].

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2022. *NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación, Available: <https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022>, [Consulted: marzo 04, 2024].

Sharghi, E.A., Davarpanah, L. 2022. "Optimization of chemical coagulation–flocculation process of detergent manufacturing plant wastewater treatment for full scale applications: a case study." *Desalination and Water Treatment*, 262: 38-53, ISSN: 1944-3986, DOI: 10.5004/dwt.2022.28494.

Suman, A., Ahmad, T. & Ahmad, K. 2018. "Dairy wastewater treatment using water treatment sludge as coagulant: A novel treatment approach." *Environment, Development and Sustainability*, 20: 1615-1625. ISSN: 1573-2975. DOI: 10.1007/s10668-017-9956-2.

World Health Organization. 2017. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. 631 p., ISBN: 978-92-4-154995-0. Disponible: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf?sequence=1>, [Consultada: Marzo 30, 2024].

Zelaya-Benavidez, E.A., Martínez-Gutiérrez, G.A., Escamirosa-Tinoco, C., Morales, I. 2021. "Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3): e3159, ISSN: 2007-901X, DOI: 10.19136/era.a8n3.3159.

Zurita, F., Tejeda, A., Ramirez-Ramirez, A., Montoya, A., 2024. "Integration of Coagulation–flocculation (with Natural Coagulant) to Constructed Wetlands for Color Removal from Tequila Vinasses". *Water*, 16: 3151. ISSN: 2073-4441, DOI: 10.3390/w16213151.