

Evaluación del potencial teórico de biometano a partir de la digestión anaeróbica de nejayote y bagazo de cerveza

Ing. José Raúl Sánchez Ramírez^a, Dr. Ricardo López Zavala^a,
Dra. Mydory Oyuky Nakasima López^b, Ing. Daniel Alfredo
Ortiz Torres^a, Dra. Sukey Sayonara Nakasima López^b, Dr.
Nicolás Velázquez Limón^a

^a Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja
California C.P., 21280, raul.sanchez94@uabc.edu.mx,
rlopez99@uabc.edu.mx,
daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx,
nicolas.velazquez@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California,
México.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad
Autónoma de Baja California,
nakasima.mydory@uabc.edu.mx, snakasima@uabc.edu.mx,
Tijuana, Baja California, México.

Resumen

La nixtamalización, un proceso ancestral de cocción del maíz, sigue siendo esencial en México para la producción de alimentos como las tortillas. Sin embargo, este procedimiento genera un subproducto contaminante conocido como nejayote, caracterizado por su elevada carga orgánica y su pH alcalino. Su disposición inadecuada representa un gran problema ambiental.

Diversos tratamientos han sido estudiados para mitigar el impacto del nejayote, incluyendo la filtración y el cultivo de microalgas. Sin embargo, la digestión anaeróbica (DA) destaca por su eficiencia y su capacidad para generar biometano, biofertilizantes y agua reutilizable. Para optimizar la producción de biometano, se propone la co-digestión anaeróbica (Co-DA) combinando el nejayote con el bagazo de cerveza, un residuo abundante en México. El bagazo, subproducto de la producción de cerveza, tiene un alto contenido de humedad y materia orgánica, además de un pH bajo, lo que favorece su sinergia con el nejayote.

En este contexto, en 2021 la producción de maíz y cerveza en Baja California generó aproximadamente 49.91 millones de litros de nejayote y entre 84.71 a 106.97 millones de litros de bagazo de cerveza. Estos residuos tienen un alto potencial para la producción de biometano mediante DA y/o Co-DA. Este estudio destaca la importancia de realizar investigaciones experimentales para validar los datos teóricos y optimizar los rendimientos. Se recomienda recolectar datos fisicoquímicos locales, llevar a cabo estudios de prefactibilidad técnico-económica y ambiental, y fomentar el uso de Co-DA. Estas acciones contribuirán a maximizar los beneficios energéticos y ambientales, impulsando una economía circular y sostenible en las industrias de maíz y cerveza en México.

Palabras clave— Bagazo de cerveza, Biometano, Digestión Anaeróbica, Nejayote, Co-Digestión Anaeróbica.

Abstract

Nixtamalization, an ancestral corn cooking process, is still essential in Mexico for the production of foods such as tortillas. However, this process generates a polluting by-product known as nejayote, characterized by its high organic load and alkaline pH. Its improper disposal represents a significant environmental problem. Various treatments have been studied to mitigate the impact of nejayote, including filtration and microalgae cultivation. However, anaerobic digestion (AD) stands out for its efficiency, and its ability to generate biomethane, biofertilizers and reusable water. To optimize biomethane production, anaerobic co-digestion (Co-DA) is proposed by combining nejayote with beer bagasse, an abundant waste in Mexico. Bagasse, a by-product of beer production, has a high moisture and organic matter content, as well as a low pH, which favors its synergy with nejayote. In this context, in 2021 corn and beer production in Baja California generated approximately 49.91 million liters of nejayote and between 84.71 to 106.97 million liters of beer bagasse. These wastes have a high potential for biomethane production by DA and/or Co-DA. This study highlights the importance of conducting experimental research to validate theoretical data and optimize yields. It is recommended to collect local physicochemical data, carry out technical-economic and environmental pre-feasibility studies, and encourage the use of Co-DA. These actions will contribute to maximize energy and environmental benefits, promoting a circular and sustainable economy in the corn and beer industries in Mexico.

Keywords— Anaerobic Digestion, Biomethane, Brewery Spent Grain, Nejayote, Anaerobic Co-Digestion.

1. INTRODUCCIÓN

La nixtamalización es un proceso de cocción de maíz que, a pesar de ser muy antiguo, actualmente sigue siendo un proceso cotidiano en México. Este proceso es fundamental para elaborar productos como las tortillas, siendo un alimento base en la dieta de la población mexicana [11]. El principal problema del proceso de nixtamalización radica en el agua residual generada tras la cocción del maíz, la cual presenta una elevada carga orgánica y un pH alcalino, lo que la hace altamente contaminante [4,8]. A esta agua residual se le conoce como nejayote. La carga orgánica presente en el agua residual puede medirse mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que cuantifica la materia susceptible a oxidarse, ya sea orgánica o inorgánica, expresada en mg/L [12]. En el caso del nejayote, se han reportado valores de DQO entre 9,000 a 53,000 mg/L [5,6,8,12]. En contraste, para considerar un cuerpo de agua en condiciones óptimas, el valor de DQO debe ser inferior a 10 mg/L [14]. Además, para su descarga en cuerpos receptores propiedad de la nación (ríos y lagos), la normativa establece que el valor debe mantenerse dentro del rango permisible de 60 a 210 mg/L, conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021 [40]. Por otro lado, el nejayote presenta un pH elevado, con valores que fluctúan

entre 9.8 y 13.1 [1,4,6,7,12], superando los límites establecidos para su vertido en cuerpos de agua, los cuales deben estar entre 6 y 9, según la misma norma [40]. Otro problema del nejayote es su alta generación. En 2012, se reportó una producción aproximada de 14.4 millones de m³/año en México [9]; sin embargo, este valor ha aumentado con el tiempo, como lo reportó Buitimea-Cantúa [10], quien menciona una generación de 50 millones de m³/año en México reportada en 2014.

La creciente generación de nejayote, junto con sus características contaminantes, hace que su vertido en el alcantarillado pueda tener graves consecuencias para la red hídrica, salud humana y el medioambiente, resultando en una problemática ambiental significativa.

Por tal razón, se han explorado alternativas de tratamiento sostenible que no solo busquen erradicar esta problemática, sino también garantizar que el recurso hídrico alcance una calidad óptima para su reutilización. Esto es especialmente relevante en procesos como la nixtamalización, donde la demanda de agua es considerable.

En este contexto, la Tabla 1 presenta distintos tratamientos que se han implementado para el manejo de este tipo de agua residual.

[5]	Digestión Anaeróbica (Biometano)	22,850±5,330	360	98	Biogás, biofertilizantes, agua tratada
[6]	Cultivo de Microalgas	9,153.3±188	250.3	97	Biocombustibles
[7]	Digestión Anaeróbica (Biohidrógeno)	29,352±1100	21,691.128	26	Biohidrógeno
[8]	Filtración	52,802.22±538.9	16,560.15	68	Sólidos con aporte farmacéutico como antioxidantes

Tabla 1. Tratamientos aplicados al nejayote.

Referencias	Tratamiento	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	μ* (%)	Productos
[1]	Filtración	40,058.14±82.22	21,783.68±115.35	46	Sólidos con nutrientes de aporte alimenticio
[2]	Digestión Anaeróbica (biometano)	24,600	450	98	Biogás, Biofertilizantes, Agua tratada
[3]	Oxidación enzimática con lacasa y quitosano como agente floculante	25,000	7,500	70	No se tienen productos esperados
[4]	Digestión Anaeróbica (Biohidrógeno)	25,080±563	18,183	27	Biohidrógeno

Fuente: Elaboración propia a partir de [1,2,3,4,5,6,7,8].

Nota: μ*=Eficiencia de reducción de DQO

Con base en los tratamientos del nejayote mostrados en la Tabla 1, se observa que, en casos como la filtración, los sólidos terminan como subproductos que se pueden reutilizar en distintos sectores como el alimenticio y el farmacéutico, sin embargo, la eficiencia en la reducción de DQO del nejayote, no es tan alta como en otros tratamientos, lo que implicaría realizar un nuevo postratamiento. En el caso de los tratamientos enzimáticos se tiene una mayor eficiencia, pero no se tienen productos esperados, en cuanto a la reutilización del recurso hídrico, también se tendría que realizar un postratamiento significativo. En el cultivo de microalgas, se destaca la generación de biocombustibles con alta eficiencia, a diferencia de la digestión anaeróbica (DA), que se enfoca en la obtención de biohidrógeno. Aunque la DA produce un biocombustible con alto potencial energético, su capacidad para reducir la DQO es limitada. En este contexto, la co-digestión anaeróbica (Co-DA) emerge como una alternativa para el tratamiento de dos o más residuos, aprovechando su interacción sinérgica en un único sistema, lo que permite optimizar la reducción de DQO [15,16]. Además, la DA centrada en la producción de metano ofrece importantes ventajas, como una alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales (98%), la generación de productos de valor agregado como biometano, que puede utilizarse como combustible para la producción de energía eléctrica o térmica, y biofertilizantes aprovechables para mejorar la calidad de los suelos. Asimismo, este proceso contribuye a la obtención de agua tratada, apta para su reutilización.

Como se mencionó anteriormente, la DA puede optimizarse mediante la Co-DA de dos o más residuos, donde las deficiencias de un residuo se compensan con las

características del otro. De esta forma es posible mejorar la generación de biometano, biofertilizantes y el tratamiento de las aguas residuales.

Un residuo con alto potencial energético y significativa generación tanto en México como a nivel mundial es el bagazo de cerveza. Este residuo se origina en la producción de cerveza, como el grano de malta agotado, del cual se extraen los azúcares necesarios para la fermentación y producción de alcohol.

Una disposición inadecuada de este residuo puede contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero, provocando impactos ambientales negativos [19]. Para su tratamiento, se han explorado diversas alternativas, como su uso en el sector salud o como fuente de alimento [20,21,22,23,41]. Sin embargo, el aprovechamiento energético ha sido la opción más estudiada, especialmente a través de la DA, debido a su alto contenido de humedad y carga orgánica, aunque presenta un pH bajo [16,17,18,24].

La producción de biometano a partir de la DA o Co-DA, requiere condiciones óptimas, entre ellas un pH neutro. En este contexto, el nejayote juega un papel clave al combinarse con el bagazo de cerveza en un proceso de Co-DA, permitiendo un mayor potencial energético sin la necesidad de estabilizadores químicos. Esto no solo reduce costos económicos, sino que también minimiza el impacto ambiental asociado al uso de estos aditivos.

Por lo que, este artículo tiene como objetivo estimar el potencial de generación de biometano a partir de la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generado en el Estado de Baja California, utilizando datos recopilados de la literatura. A partir de investigaciones sobre el proceso, promedios de generación de nejayote y rendimientos de biometano, se calcularán los valores estimados de producción en la región. Estos resultados permiten analizar las oportunidades y formular recomendaciones para su aprovechamiento.

2. CONTENIDO

2.1 Metodología

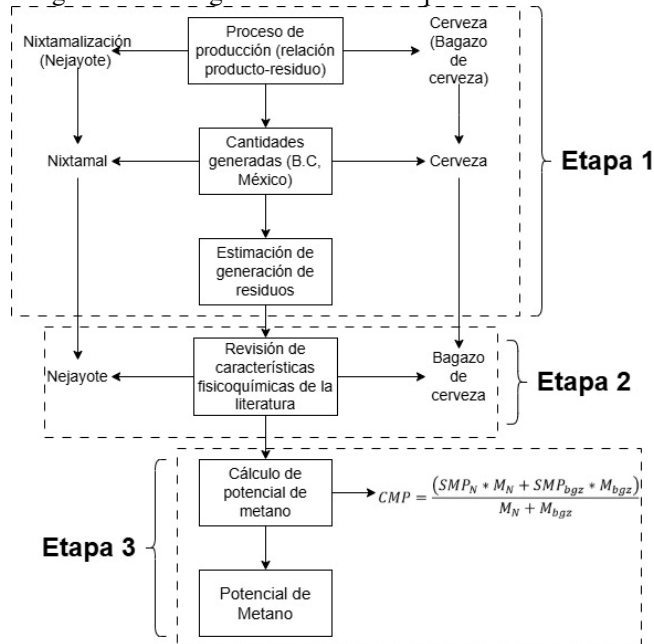
A fin de abordar las cuestiones antes mencionadas de manera sistemática, se realizó una búsqueda bibliográfica para obtener la caracterización fisicoquímica de ambos residuos, así como datos sobre las equivalencias de producción y generación tanto en México como en el Estado de Baja California. De acuerdo con la metodología presentada en la Figura 1, el proceso se divide en tres etapas:

- Etapa 1: Obtener la generación de nejayote y bagazo de cerveza en Baja California, México. Para ello, la etapa se divide en sub-etapas, aplicadas a cada uno de los procesos en particular, siendo las siguientes:
 - 1.1. Se recopilan los datos del proceso de tanto de la producción de nixtamalización como de

la producción cerveza. Estos datos funcionan como indicadores clave relacionados con la generación de los residuos de interés.

- 1.2. Se recopila información sobre la producción de nixtamal y cerveza en el Estado de Baja California, México (producción de maíz, porcentaje destinado a nixtamalización, entre otros).
- 1.3. Con base en los datos obtenidos de la etapa anterior se realiza una estimación cuantitativa de la generación de residuo (nejayote y bagazo de cerveza) en Baja California. Esta estimación es fundamental para calcular el porcentaje potencial de residuos susceptible a transformarse en biogás rico en metano.
- Etapa 2: Se lleva a cabo una revisión de la caracterización fisicoquímica de ambos residuos, con especial atención a los datos de sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO) y rendimiento de metano en monodigestión (SMP), ya que estos parámetros son cruciales para la estimación del potencial de generación de metano.
- Etapa 3: Finalmente, utilizando los datos de generación de residuos en Baja California, México, junto con la caracterización fisicoquímica obtenida, se calcula el potencial de generación de metano.

Fig. 1. Metodología de obtención de potencial de metano.



Fuente: Elaboración propia a partir de [25].

En la Figura 1 se muestra la ecuación 1, la cual se explica a continuación.

$$CMP = \frac{(SMP_N * M_N + SMP_{bgz} * M_{bgz})}{M_N + M_{bgz}}$$

[25]

donde CMP es el potencial de metano calculado, SMP el rendimiento de metano en monodigestión (medido en m^3/kgSV o m^3/kgDQO), M la masa de SV o DQO del residuo. Para el caso particular del estudio, dividirlo entre la masa de los residuos no es requerido, debido a que el potencial de generación de metano sería en realidad la suma del dividendo de la ecuación.

A continuación, se explicarán a detalle las distintas etapas mostradas en la Figura 1.

2.2 Proceso de nixtamalización

El proceso de nixtamalización ha sido utilizado desde la antigüedad en civilizaciones mexicanas. Con el paso del tiempo, se ha perfeccionado, y su utilización sigue siendo de las más comunes para el procesamiento del maíz y elaboración de alimentos como las tortillas, que es un producto base de la dieta de la población mexicana [9,11].

El proceso consiste en la cocción del grano de maíz en mezcla con agua y calcio. La proporción entre agua y grano de maíz que se utiliza frecuentemente es de 2 a 3 litros de agua por kilogramo de maíz. El proceso tiene como objetivo desprender ciertas capas del grano que le aportan una textura de dureza. De esta forma, al ser desprendidas, el mismo grano se mantiene en una textura gelatinizada parcialmente, permitiendo llevar a cabo el proceso de molienda, y obtener la masa de nixtamal, con la cual se da la forma y el horneado para el producto final, como lo son las tortillas o los totopos [26,27]. Previamente, el agua utilizada, se mantuvo en reposo junto al grano, y una vez terminado este lapso, el grano procede a una molienda, mientras que el agua de cocción se filtró y se pasó a su depósito al alcantarillado. Esta agua es conocida como el nejayote [28].

De acuerdo con Romo, M. G. G. [30], la producción nacional de maíz en el 2021 fue de 27 millones de toneladas. A su vez el Sistema de Información Agroalimentaria y de Pesca (SIAP), informa que en México el 57% del maíz producido es destinado a la elaboración de tortillas [30].

Con estos datos, y considerando que en Baja California la producción de maíz en el 2021 fue de 26,270.62 toneladas [32], se estima que la cantidad de grano de maíz destinado a la producción de tortillas en el estado es de alrededor de 14,974.2534 toneladas.

La literatura reporta que la generación de nejayote estimado a partir de molinos e industrias del maíz van de los 1,500 a 2,000 m^3 por 600 toneladas de maíz procesado [29]. Por lo tanto, a partir de estos datos, se realizó una estimación propia, que refleja que la generación de nejayote en Baja California en el año de 2021 fue entre los 37.44 a 49.91 millones de litros.

2.3 Proceso de producción de cerveza

El proceso de producción de la cerveza consiste en 5 etapas principales [33]:

1. El proceso comienza con la molienda de la malta, seguida de la maceración, en el cual el grano se

cuece en agua para extraer los azúcares fermentables.

2. A continuación, se realiza el lavado de los granos con la misma mezcla de agua, permitiendo que esta continúe absorbiendo los azúcares remanentes.
3. En la tercera etapa el líquido resultante, que ha absorbido los azúcares, se le añade lúpulo para aportar el sabor amargo y el aroma característico de la cerveza.
4. Terminado el proceso se realiza un centrifugado para eliminar residuos como el mosto y por consiguiente se realiza la fermentación, regulando la temperatura y agregando levadura. La levadura se encarga de consumir los azúcares y produce alcohol y dióxido de carbono, obteniendo la conocida cerveza.
5. A continuación, se lleva a cabo la maduración y el filtrado de la levadura, para finalmente realizar el embotellado y que esta pueda ser distribuida.

Este proceso, al contrario de la nixtamalización, tiene como producto final el recurso hídrico utilizado, sin embargo, no lo exenta de generar residuos, y en este caso, uno sólido orgánico como lo es el bagazo de cerveza. El bagazo de cerveza son los granos gastados para el proceso de maceración y estos terminan siendo desechados al terminar la filtración.

La generación estimada de bagazo en el proceso de producción se encuentra en un 85%, una cantidad total de residuo de 137 a 173 toneladas por cada 1,000 toneladas de cerveza [34,35]. En 2019, México tuvo una producción de 12,450 millones de litros de cerveza, de los cuáles, a Baja California le correspondió el 5.2%, lo que representa 647.4 millones de litros de cerveza [31]. A partir de estos datos se puede realizar una estimación de la generación de bagazo de cerveza en el Estado de Baja California, lo que representa de 84.71 a 106.97 millones de litros.

Teniendo los datos estimados de generación de nejayote y Bagazo de cerveza en el Estado de Baja California México, solo falta conocer la caracterización fisicoquímica de ambos.

2.4 Características fisicoquímicas del nejayote y bagazo de cerveza

La caracterización fisicoquímica nos permite conocer parámetros específicos de los residuos. Ciertos parámetros como lo son los SV o la DQO, nos permiten conocer la cantidad de materia orgánica que existe en mg/L , y a partir de estas cifras, conocer el potencial energético que puede ofrecer el residuo, en este caso, el potencial teórico de metano.

En la Tabla 2 se presentan los parámetros fisicoquímicos del nejayote, incluyendo dos datos sobre el rendimiento de metano medido en litros por kilogramo de DQO. Esto indica que será necesario considerar este parámetro para el cálculo del potencial de generación de metano.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de nejayote.

Referencias	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	BMP (LCH ₄ /kg DQO)
[36]				17,406.24	217.76
[1]	11.39			40,058.14	
[4]	12	24,466.7	19,293.3	25,080	
[5]	9	25,000		22,850	282

Fuente: Elaboración propia a partir de [1,4,5,36].

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos del bagazo de cerveza, presentados en la Tabla 3, se recopilaron tres datos sobre el rendimiento de metano. Sin embargo, estos se expresan en litros por kilogramo de sólido volátil (L/kgSV), lo que indica que, a diferencia del nejayote, se debe considerar el parámetro de SV.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de bagazo de cerveza.

Referencias	pH	SV (%)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	BMP (LCH ₄ /kgSV)
[18]			219,569.6	205,879.2	292,468.8	333
[16]	6.19		223,900	215,100	72,623	
[33]	5.8	97.15			41,500 (DQOs)	356
[37]	5.82	96.65				308.77

Fuente: Elaboración propia a partir de [16,18,33,37].

Nota: DQOs, se refiere a la DQO soluble del residuo, es decir, la fracción que se mantiene disuelta en el cuerpo líquido, descartando DQO de sólidos suspendidos.

Teniendo la caracterización fisicoquímica de la literatura ha sido posible realizar la estimación teórica de generación de metano a partir de la Digestión Anaeróbica de nejayote y Bagazo de cerveza, dos residuos abundantes en el país.

2.5 Cálculo de Potencial de Metano

Una vez realizada la búsqueda de literatura y obtenido los valores promedios relevantes, se procede al cálculo de potencial de metano, donde se utilizó la ecuación 1.

Tabla 4. Potencial de generación de biometano de nejayote y bagazo de cerveza en el Estado de Baja California, México.

Parámetros	Nixtamalización	Producción de Cerveza
Generación de producto	14,974.25 toneladas	647,400 m ³
Generación de Residuos (M de L) *	37.44 a 49.91	84.71 a 106.97
Potencial de Metano (M de m ³ de CH ₄) *	0.241 a 0.321	5.807 a 7.333

Fuente: Elaboración propia a partir de [29,30,31,32]. Nota*: Millones de litros (M de L) y Millones de metros cúbicos de metano (M de m³ de CH₄).

En la Tabla 4, se presentan los datos estimados de generación de metano a partir del nejayote, calculados con base en la nixtamalización destinada a la elaboración de tortillas en México durante el año 2021. Por otro lado, las estimaciones de metano provenientes de la producción de cerveza se basan en datos del 2019.

Al comparar ambos casos, se observa que la generación de residuos de bagazo de cerveza es significativamente mayor que la de nejayote, lo que se traduce en un potencial de biometano considerablemente más alto. No obstante, la generación de metano considerando ambos residuos en un proceso de co-digestión anaeróbica representa un alto potencial de aprovechamiento energético en el estado, tanto para la producción de energía eléctrica como térmica.

Considerando que el valor calorífico del metano es de 10 kWh/m³ [38], la suma energética de ambos residuos a partir del potencial de generación de biometano da un resultado de 68.51 millones de kWh promedio. De acuerdo con la EPA [39], esta generación representa 26,961 toneladas métricas de CO₂ equivalente. Otras equivalencias son el consumo eléctrico de 5,618 casas al año; alrededor de 3 millones de galones de gasolina consumidos, o 1.2 millones de cilindros de propano consumidos.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Digestión Anaeróbica del nejayote y el bagazo de cerveza ha demostrado ser una alternativa prometedora para el tratamiento de estos residuos. Su implementación no solo contribuye a la gestión sostenible de desechos, sino que también genera productos de valor agregado, como el tratamiento eficiente de aguas residuales y la producción de un biocombustible rico en metano, con alto potencial para su aprovechamiento energético en aplicaciones eléctricas y

térmicas.

En Baja California, México se identifica un potencial teórico significativo para la producción de biometano a partir de estos residuos. No obstante, en este estudio se han utilizado datos provenientes de la literatura, a partir de los cuales se realizaron estimaciones aproximadas. Los resultados obtenidos corresponden a valores teóricos, por lo que es necesario llevar a cabo estudios experimentales para determinar con mayor precisión los rendimientos reales de generación.

Con base en estos hallazgos, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Actualización de datos sobre la generación de residuos locales: Es necesario recopilar y actualizar la información sobre la generación de residuos derivados de las actividades de nixtamalización y producción de cerveza en la región.
- Caracterización fisicoquímica de residuos locales: Para obtener datos más precisos sobre el potencial energético, es fundamental analizar las características fisicoquímicas de los residuos generados en la región, así como cuantificar su disponibilidad.
- Estudios experimentales: Se recomienda realizar pruebas experimentales en condiciones piloto y controladas para evaluar la digestión anaeróbica de estos residuos locales. Es crucial monitorear parámetros clave como el pH, la relación carbono-nitrógeno y las condiciones de temperatura (mesofílica o termofílica) para optimizar el proceso.
- Análisis de prefactibilidad técnica, económica y ambiental: Aunque el potencial de generación de biometano es alto, se requiere un análisis detallado de las condiciones reales de implementación. Por lo que es necesario determinar si el proyecto puede desarrollarse a gran escala o si debe fraccionarse, además de evaluar la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento, el retorno de inversión y otros aspectos financieros y ambientales.
- Co-DA: Se recomienda la codigestión anaeróbica del nejayote y el bagazo de cerveza ya que podría favorecer la estabilidad del pH y generar un efecto sinérgico que optimice la producción de biometano. Además, permitiría gestionar dos de los residuos agroindustriales más abundantes en México dentro de un mismo sistema, promoviendo un modelo de economía circular y fortaleciendo la simbiosis entre dos industrias clave del sector alimentario.

3.1 Agradecimientos

Se agradece a CONAHCYT por el apoyo durante esta investigación a través de la beca de posgrado, así como al Instituto de Ingeniería y Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UABC, que proporcionaron y facilitaron los

medios para llevar a cabo esta investigación dentro del proyecto interno de UABC con clave 111/6/C/20/25, titulado “Transformando residuos en recursos: simbiosis industrial y economía circular en la producción de biogás y agua tratada con nejayote y bagazo de cerveza”.

4. REFERENCIAS

- [1] Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J. C., Rojas-Molina, A., Beristain, F., & Rodríguez-García, M. E. (2012). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 478–486. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.12.018>.
- [2] Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 517-525. Recuperado en 05 de febrero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000200016&lng=es&tlng=es.
- [3] García-Zamora, J. L., Sánchez-González, M., Lozano, J. A., Jáuregui, J., Zayas, T., Santacruz, V., Hernández, F., & Torres, E. (2015). Enzymatic treatment of wastewater from the corn tortilla industry using chitosan as an adsorbent reduces the chemical oxygen demand and ferulic acid content. *Process Biochemistry*, 50(1), 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2014.10.012>.
- [4] García-Depraet, O., Gómez-Romero, J., León-Becerril, E., & López-López, A. (2017). A novel biohydrogen production process: Co-digestion of vinasse and Nejayote as complex raw substrates using a robust inoculum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9), 5820–5831. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.204>.
- [5] España-Gamboa, E., Domínguez-Maldonado, J.A., Tapia-Tussell, R. et al. Corn industrial wastewater(nejayote): a promising substrate in Mexico for methane production in a coupled system (APCR-UASB). *Environ Sci Pollut Res* 25, 712–722 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0479-z>.
- [6] López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2019). Combination of nejayote and swine wastewater as a medium for *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris* production and wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 676, 356–367. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.278>.
- [7] Del Angel-Acosta, Y. A., Alvarez, L. H., Garcia-Reyes, R. B., Carrillo-Reyes, J., Garcia-Gonzalez, A., & Meza-Escalante, E. R. (2021). Co-digestion of corn (nejayote) and brewery wastewater at different ratios and pH conditions for biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27422–27430. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.05.208>.
- [8] Valderrama-Bravo, C., Fuentes-Prado, E., Porras-Godínez, M. R., Ramírez-Ortiz, M. E., Reyna-Granados, M. A., & Gutiérrez-Cortez, E. (2022). Mechanical separation of

- a nixtamalization by-product (nejayote) and scaling of filtration conditions from a pilot filter to a press filter of higher area. *Journal of Food Engineering*, 328, 111058. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2022.111058>.
- [9] Rojas-García, C., García-Lara, S., Serna-Saldivar, S.O. *et al.* Chemopreventive Effects of Free and Bound Phenolics Associated to Steep Waters (Nejayote) Obtained After Nixtamalization of Different Maize Types. *Plant Foods Hum Nutr* 67, 94–99 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0272-y>.
- [10] Buitimea-Cantúa, N. E., Antunes-Ricardo, M., Gutiérrez-Uribe, J. A., del Refugio Rocha-Pizaña, M., de la Rosa-Millán, J., & Torres-Chávez, P. I. (2020). Protein-phenolic aggregates with anti-inflammatory activity recovered from maize nixtamalization wastewaters (nejayote). *LWT*, 134, 109881. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109881>.
- [11] Méndez-Albores, J. A., Arámbula-Villa, G., Loarca-Piña, M. G., González-Hernández, J., Castaño-Tostado, E., & Moreno-Martínez, E. (2004). Aflatoxins 'fate during the 72 nixtamalization of contaminated maize by two tortilla-making processes. *Journal of Stored Products Research*, 40(1), 87–94. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(02\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(02)00080-2)
- [12] Meraz, K. A. S., Vargas, S. M. P., Maldonado, J. T. L., Bravo, J. M. C., Guzman, M. T. O., & Maldonado, E. A. L. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation–flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536–542. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.09.026>
- [13] Li, J., Luo, G., He, L., Xu, J., & Lyu, J. (2018). Analytical approaches for determining chemical oxygen demand in water bodies: a review. *Critical reviews in analytical chemistry*, 48(1), 47–65.
- [14] CONAGUA. (junio de 2020). SEMARNAT, GOBIERNO DE MEXICO. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECÚADROS_INT_GLOS/D3_AGU A/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm.
- [15] Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 517-525. Recuperado en 05 de febrero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000200016&lng=es&tlng=es.
- [16] Szaja A, Montusiewicz A, Lebiocka M, Bis M. 2020. El efecto de la aplicación de grano gastado de cervecería en los rendimientos de biogás y la cinética en la codigestión con lodos de depuradora. *PeerJ* 8: e10590 <https://doi.org/10.7717/peerj.10590>
- [17] Lima Moraes dos Santos, A., de Sousa e Silva, A., Sales Morais, N. W., & Bezerra dos Santos, A. (2023). Brewery Spent Grain as sustainable source for value-added bioproducts: Opportunities and new insights in the integrated lignocellulosic biorefinery concept. *Industrial Crops and Products*, 206, 117685. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023>
- [18] Bougrier, C., Dognin, D., Laroche, C., & Cacho Rivero, J. A. (2018). Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. *Journal of Environmental Management*, 223, 101–107. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.06.014>
- [19] Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P., Castro, C., Calado, L., & Vilarinho, C. (2019). Experimental analysis of brewers' spent grains steam gasification in an allothermal batch reactor. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050912>
- [20] Patrignani, M., Brantsen, J. F., Awika, J. M., & Conforti, P. A. (2021). Application of a novel microwave energy treatment on brewers' spent grain (BSG): Effect on its functionality and chemical characteristics. *Food Chemistry*, 346, 128935. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128935>
- [21] Mussatto, S. I., Moncada, J., Roberto, I. C., & Cardona, C. A. (2013). Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: The Brazilian case. *Bioresource technology*, 148, 302-310.
- [22] Emmanuel, J. K., Nganyira, P. D., & Shao, G. N. (2022). Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review. *Heliyon*, 8(10), e11140. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2022.E11140>
- [23] Castro, L. E. N., Sganzerla, W. G., Matheus, L. R., Mançano, R. R., Ferreira, V. C., Barroso, T. L. C. T., da Rosa, R. G., & Colpini, L. M. S. (2023). Application of brewers' spent grains as an alternative biomass for renewable energy generation in a boiler combustion process. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4, 100039. <https://doi.org/10.1016/J.SCENV.2023.100039>
- [24] Tewelde, S., Eyalarasan, K., Radhamani, R., & Karthikeyan, K. (2012). Biogas production from co-digestion of brewery wastes [BW] and cattle dung [CD]. *Int. J. Latest Trends Agric. Food Sci*, 2(2), 90-93. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84893448301&origin=inward&txGid=a63c4c7765396211ae a881b66b809f8c>
- [25] Du, X., Tao, Y., Li, H., Liu, Y., & Feng, K. (2019). Synergistic methane production from the anaerobic co-digestion of *Spirulina platensis* with food waste and sewage sludge at high solid concentrations. *Renewable Energy*, 142, 55–61. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.04.062>
- [26] Arriaga González, I. (2021). Evaluación del efecto anticancerígeno y antiinflamatorio de los ácidos fenólicos presentes en nejayote derivado del maíz variedad Bolita.
- [27] Ramírez-Jiménez, A. K., & Castro-Muñoz, R. (2021). Emerging techniques assisting nixtamalization products and by-products processing: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(20), 3407-3420.
- [28] Maldonado, Y. M., Alonso-Lemus, I. L., Sarabia-Castillo, C. R., Escobar-Morales, B., Ríos González, L. J., Fernández-Luqueño, F., & Rodríguez-Varela, F. J. (2024). Sewage sludge derived biocarbons as catalysts of bioanodes in a dual-chamber microbial fuel cell using nejayote as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [29] Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda-Santiago, V., Cristiani-Urbina, E., Juárez Ramírez, C., Ruiz-

Ordaz, N., & Galíndez-Mayer, J. (2003). Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage bioreactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(5), 401-406.

[30] Romo, M. G. G. (2024). El maíz y la tortilla: la base de la alimentación del mexicano. *Milenaria, Ciencia y arte*, (24), 22-25.

[31] INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf

[32] SIAP. (13 de junio de 2022). Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

[33] Mainardis, M., Flaibani, S., Mazzolini, F., Peressotti, A., & Goi, D. (2019). Techno-economic analysis of anaerobic digestion implementation in small Italian breweries and evaluation of biochar and granular activated carbon addition effect on methane yield. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103184. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.103184>

[34] Reinold, M. R. (1997). Manual práctico de cervejaria. *São Paulo: Aden*, 214.

[35] Caliskan, G., Giray, G., Gundogdu, T. K., & Azbar, N. (2014). Anaerobic biodegradation of beer production wastewater at a field scale and exploitation of bioenergy potential of other solid wastes from beer production. *Int. J. Renew. Energy Biofuels*, 2014, h1-15.

[36] Tovar Gálvez, L.R (2013). Método para la captura de CO₂ del biogás utilizando nejayote y recarga de este efluente saturado con CO₂ al mismo digestor anaerobio (México No. MX/a/2012/007621). IMPI. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2012/007621>

[37] Polastri, P., Moreira, W. M., Martins, D. C. C., Fiewski, A. C., Schüller de Oliveira, M. A., Janeiro, V., Vareschini, D. T., & Gimenes, M. L. (2024). Anaerobic co digestion of bovine ruminal waste and brewery spent grain: Effects of inoculum to substrate ratio, mixing ratio, process stability, organic matter removal, and methane yield. *Biochemical Engineering Journal*, 210, 109414. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2024.109414>

[38] FAO. (2011). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

[39] EPA. (2024). EPA Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero>.

[40] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas nacionales*. Diario Oficial de la Federación.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5645374

[41] Naibaho, J., Setiawan, R. D., & Korzeniowska, M. (2025). Biological properties of bioactive compounds from brewers' spent grain: current trends, challenges, and perspectives. *Current Opinion in Food Science*, 62, 101268. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2024.101268>