

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

---

ESTUDIO TECNO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL PROCESO  
DE CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL NEJAYOTE CON BAGAZO  
DE CERVEZA

---

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**JOSÉ RAÚL SÁNCHEZ RAMÍREZ**

DIRECTORES:  
**DR. RICARDO LÓPEZ ZAVALA**  
**DRA. MYDORY OYUKY NAKASIMA LÓPEZ**

Mexicali, B.C., México a junio del 2025

# DEDICATORIA

*Dedicado a mis papás por apoyarme siempre en mis mejores y peores momentos, por ser los pilares que me han mantenido a flote en la vida y me han dado todas las herramientas para salir adelante. A mi hermana por escucharme y hacer más sencillo el día a día con su compañía, alegría y humor. A mis amigos por la convivencia y por ser parte de este viaje codo a codo, compartir experiencias y el apoyo mutuo. A mi novia que también formó parte de este viaje y significó mucho su compañía, no solo por su cariño, sino también por ayudarme a enfocarme y por entenderme en todo momento.*

***"Won't fail unless I try"***

Imagine Dragons.

# AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis el Dr. Ricardo López Zavala y la Dra. Mydory Oyuky Nakasima López por brindarme su confianza, su apoyo, su guía, paciencia y la oportunidad de realizar esta tesis. Agradezco haber coincidido con ustedes en la vida y en los temas de investigación. No pude tener mejores tutores para realizarme en esta etapa, en la que me han motivado a seguir trabajando y alcanzar el potencial que se puede lograr.

A mi familia, que siempre han estado junto a mi, apoyandome, dandome cariño y amor incondicional. Gracias a ustedes soy quien soy, y me han estado acompañado no solo en esta etapa, sino en todas las etapas de mi vida de principio a fin. Papás, hermana, ustedes han visto mis triunfos, han visto mis derrotas, y la reacción de ustedes ante estos momentos siempre ha sido la misma, abrazar mi corazón y motivarme a seguir adelante y a nunca rendirme.

A mis colegas y amigos del Instituto de Ingeniería, compartir con ustedes el día a día tanto en nuestras responsabilidades como en momentos de óseo, descanso y convivio le ha dado esa chispa de alegría a esta etapa y sin ustedes estaría vacía.

A mi novia, Anette Osuna que quizá llegaste a mitad o hasta casi el final de este camino, pero en tan poco tiempo has influido mucho en mi persona. Gracias a ti aprendí a ser mas organizado y enfocarme mejor en mis objetivos. A parte de el cariño, el afecto, tu admiración, y darle un color tan bonito a mi vida con tu sentido del humor, eres parte crucial de la culminación exitosa de este trabajo de investigación.

Al instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, al Laboratorio de Residuos Sólidos y al Dr. Nicolás Velázquez Limón y al Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER), por su apoyo para realizar y culminar el proyecto de investigación.

Agradezco también a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado que me dió la estabilidad para realizar mis estudios de maestría.

# RESUMEN

En México, existen dos industrias que tienen una gran generación de residuos orgánicos debido a la alta demanda de sus productos. Estas industrias son las de nixtamalización y producción de cerveza, generadoras de nNejayote y bBagazo de cerveza respectivamente. El nejayote es un efluente residual con una elevada carga orgánica, por lo que resulta fundamental evaluar su nivel de contaminación para determinar estrategias de tratamiento adecuadas. Uno de los indicadores más utilizados en la caracterización de contaminantes en aguas residuales es la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual cuantifica la concentración de materia orgánica e inorgánica presente. Este parámetro es esencial, ya que permite estimar el impacto ambiental del efluente y su potencial efecto contaminante en los cuerpos de agua receptores. El Nejayote es un agua residual con alta carga orgánica, medida a partir de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), definida como la materia orgánica o inorgánica susceptible a la oxidación que se puede medir en mg/L y en el caso del recurso hídrico puede representar el nivel de contaminación. A pesar de que el proceso de nixtamalización tiene siglos de operación, sigue siendo la forma más común de trabajar el maíz. Por otro lado, en la industria cervecera se genera el tiene la generación de bagazo de cerveza, que consiste ensiendo el grano gastado resultante del de este proceso de producción. Una mala gestión deficiente e inapropiada del nNejayote y el bBagazo de cerveza influiría en la contaminación y reservas del recurso hídrico y a su vez, un impacto ambiental poren la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) respectivamente. Se han realizado estudios de aplicaciones mecánicas, químicas y biológicas para el tratamiento del Nejayote, sin embargo, esta industria sigue representando un problema en la alta generación de aguas residuales. Un tratamiento renovable que podría impulsar a una buena gestión adecuada de ambos residuos es la Digestión Anaeróbica (DA). La DA es un proceso natural de degradación de materia orgánica que da como resultado generación de un biocombustible aprovechable como energía térmica y/o eléctrica. Este proceso se ha llevado a cabo como tratamiento para cada residuo, sin embargo, no se han sometido aen un proceso de Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA). Dado que el volumen de generación de nejayote es significativamente mayor en comparación con el bagazo de cerveza y representa una fuente de contaminación más problemática, este estudio se enfoca en la evaluación del proceso de nixtamalización. Aunque el bagazo de cerveza también es un residuo relevante, su impacto local es menor debido a su aprovechamiento como alimento para el ganado; por ello, en este estudio se considera como un co-sustrato para optimizar el tratamiento del nejayote. Por lo tanto, en esta investigación se propone realizar la caracterización fisicoquímica de ambos residuos en conjunto para estimar el potencial teórico máximo de biogás. A partir de esta estimación, se evaluará la reducción de costos económicos y ambientales del proceso de nixtamalización de una empresa en particular. El llevar a cabo esta evaluación permitirá conocer la viabilidad económica, energética y ambiental del proceso de nixtamalización, lo que servirá como punto de partida para llevar a cabo un proyecto de inversión con una tecnología basada en la Co-DA de ambos residuos.

# ABSTRACT

In Mexico, there are two industries that generate a large amount of organic waste due to the high demand for their products. These industries are the nixtamalization and beer production industries, which generate nejayote and beer bagasse, respectively. Nejayote is a waste effluent with a high organic load, so it is essential to evaluate its level of contamination in order to determine appropriate treatment strategies. One of the most widely used indicators in the characterization of pollutants in wastewater is Chemical Oxygen Demand (COD), which quantifies the concentration of organic and inorganic matter present. This parameter is essential, since it allows estimating the environmental impact of the effluent and its potential polluting effect on the receiving water bodies. On the other hand, the brewing industry generates beer bagasse, which consists of the spent grain resulting from the production process. Deficient and inappropriate management of nejayote and beer bagasse would have an impact on the contamination and reserves of water resources and, in turn, an environmental impact due to the accumulation of greenhouse gases (GHG), respectively. Studies have been conducted on mechanical, chemical and biological applications for the treatment of Nejayote, however, this industry still represents a problem in the high generation of wastewater. A renewable treatment that could lead to a proper management of both wastes is Anaerobic Digestion (AD). AD is a natural process of organic matter degradation that results in a biofuel that can be used as thermal and/or electrical energy. This process has been carried out as a treatment for each waste, however, they have not been subjected to an Anaerobic Co-Digestion (Co-DA) process. Since the volume of nejayote generation is significantly higher compared to beer bagasse and represents a more problematic source of contamination, this study focuses on the evaluation of the nixtamalization process. Although beer bagasse is also a relevant waste, its local impact is lower due to its use as cattle feed; therefore, in this study it is considered as a co-substrate to optimize the treatment of nejayote. Therefore, in this research it is proposed to perform the physicochemical characterization of both wastes together to estimate the maximum theoretical biogas potential. From this estimation, the reduction of economic and environmental costs of the nixtamalization process of a particular company will be evaluated. Carrying out this evaluation will allow knowing the economic, energetic and environmental viability of the nixtamalization process, which will serve as a starting point to carry out an investment project with a technology based on the Co-DA of both wastes.

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>   | <b>8</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 Introducción</b>   | <b>12</b> |
| 1.1 Problemática y Justificación  | 14        |
| 1.2 Antecedentes  | 17        |
| 1.3 Preguntas de investigación  | 22        |
| 1.4 Objetivos   | 22        |
| 1.4.1 General   | 22        |
| 1.4.2 Específicos   | 23        |
| 1.5 Hipótesis   | 23        |
| 1.6 Metodología   | 23        |
| 1.7 Resultados esperados de la investigación  | 24        |
| <b>2 Fundamentos Teóricos</b>   | <b>26</b> |
| 2.1 Residuos Sólidos y Biomasa  | 26        |
| 2.1.1 Tipos de Residuos Sólidos   | 27        |
| 2.1.2 ¿Qué es biomasa?  | 28        |
| 2.1.3 Ciclo de la biomasa   | 29        |
| 2.1.4 Tipos de biomasa  | 30        |
| 2.2 Generalidades del Agua Residual   | 31        |
| 2.2.1 Agua Residual   | 31        |
| 2.2.2 Tipos de Aguas Residuales   | 32        |
| 2.3 Nejayote un agua residual con alto potencial energético   | 33        |
| 2.3.1 Nixtamalización   | 33        |
| 2.3.2 Nejayote  | 34        |
| 2.4 Proceso de Producción de Cerveza  | 35        |
| 2.4.1 Bagazo de cerveza   | 38        |
| 2.5 Tratamientos convencionales del nejayote  | 38        |
| 2.5.1 Tratamientos Mecánicos  | 38        |
| 2.5.2 Tratamientos Químicos   | 39        |
| 2.5.3 Tratamientos Biológicos   | 41        |
| 2.5.4 Digestión Anaeróbica DA   | 42        |
| 2.6 Aprovechamiento del bagazo de cerveza: potencial nutricional, componentes bioactivos y uso energético | 43        |
| 2.6.1 Uso del bagazo de cerveza en la alimentación animal   | 43        |
| 2.6.2 Uso del bagazo de cerveza en la alimentación humana   | 44        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.6.3    | Extracción de compuestos bioactivos del bagazo de cerveza . . . . .  | 44        |
| 2.6.4    | Producción de energía y biocombustibles . . . . .  | 45        |
| 2.7      | Etapas de la DA . . . . .  | 46        |
| 2.8      | Importancia de los sólidos en el sustrato para la DA . . . . .   | 48        |
| 2.8.1    | Tipos de sólidos y su medición . . . . .   | 48        |
| 2.9      | Balance en el pH y su relevancia en la DA . . . . .  | 49        |
| 2.9.1    | Factores que afectan el equilibrio del pH en la DA . . . . .   | 50        |
| 2.9.2    | Rangos de pH en las etapas de la DA . . . . .  | 50        |
| 2.10     | Temperatura . . . . .  | 51        |
| 2.11     | Importancia de la relación Carbono/Nitrógeno C:N en la DA . . . . .  | 51        |
| 2.11.1   | Desequilibrios en la relación C:N . . . . .  | 52        |
| 2.12     | Demanda Química de Oxígeno DQO . . . . .   | 52        |
| 2.12.1   | Calsificación de calidad del agua en función de la DQO . . . . .   | 53        |
| 2.13     | Co-Digestión Anaeróbica Co-DA . . . . .  | 53        |
| 2.13.1   | Biogás . . . . .   | 54        |
| 2.13.2   | Rendimiento de Metano . . . . .  | 55        |
| 2.13.3   | Biofertilizantes . . . . .   | 55        |
| 2.13.4   | Agua Tratada . . . . .   | 55        |
| 2.14     | La Co-DA como un Impulso hacia la Economía Circular . . . . .  | 56        |
| 2.15     | Principales indicadores de una evaluación económica . . . . .  | 57        |
| 2.15.1   | Costos de Capital . . . . .  | 57        |
| 2.15.2   | Costos Operativos . . . . .  | 58        |
| 2.15.3   | Ingresos . . . . .   | 58        |
| 2.15.4   | Valor Actual Neto (VAN) . . . . .  | 59        |
| 2.15.5   | Tasa Interna de Retorno (TIR) . . . . .  | 60        |
| 2.15.6   | Período de Retorno . . . . .   | 60        |
| 2.15.7   | Análisis de Sensibilidad . . . . .   | 61        |
| 2.16     | Evaluación Ambiental . . . . .   | 62        |
| 2.16.1   | Gases de Efecto Invernadero (GEI) . . . . .  | 62        |
| 2.16.2   | CO <sub>2</sub> equivalente . . . . .  | 63        |
| <b>3</b> | <b>Estudios y resultados del caso base en comparación con la propuesta tecnológica</b> . . . . .                                   | <b>65</b> |
| 3.1      | Propuesta de simbiosis industrial a partir de la biometanización del nejayote y bagazo de cerveza . . . . .                        | 65        |
| 3.1.1    | Beneficios socioeconómicos . . . . .   | 67        |
| 3.1.2    | Beneficios ambientales . . . . .   | 68        |
| 3.2      | Caso Base . . . . .  | 69        |
| 3.3      | Caracterización Fisicoquímica . . . . .  | 74        |
| 3.3.1    | Resultados de la Caracterización Fisicoquímica del nejayote y bagazo de cerveza . . . . .  | 84        |
| 3.4      | Estudio de potencial de metano del nejayote y bagazo de cerveza a partir de DA . . . . .   | 89        |
| 3.4.1    | Resultados del análisis potencial de biometano y sus efectos en la reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> equivalente . . . . . | 95        |
| 3.5      | Análisis de prefactibilidad de la propuesta tecnológica . . . . .  | 100       |
| 3.5.1    | Resultados del estudio económico . . . . .   | 102       |

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>4 Conclusiones</b> | <b>119</b> |
| <b>REFERENCIAS</b>    | <b>121</b> |

# LISTA DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Ciclo de la biomasa, elaboración propia a partir de (Velázquez Martí, 2018).  | 30 |
| 2.2  | Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización (Vázquez-López et al., 2023).                                    | 34 |
| 2.3  | Diagrama de flujo del proceso de Producción de Cerveza, Elaboración propia basado en (LIPA, 2020).                  | 37 |
| 2.4  | Tratamiento de Coagulación-Floculación del Nejayote (Meraz et al., 2016).   | 40 |
| 2.5  | Tratamiento de Nejayote a partir de biorreactores aeróbicos en cascada (Salmerón Alcocer et al., 2003).             | 42 |
| 2.6  | Etapas de la Digestión Anaeróbica (FAO, 2011).  | 48 |
| 3.1  | Propuesta de simbiosis industrial de nixtamalización y la producción de cerveza. Fuente propia.                     | 67 |
| 3.2  | Diagrama de la dinámica del proceso actual de la empresa de nixtamalización. Fuente propia.                         | 70 |
| 3.3  | Metodología de muestreo y análisis de nejayote. Fuente propia   | 75 |
| 3.4  | Muestreo inicial de nejayote  | 76 |
| 3.5  | Salida de nejayote inferior del tanque  | 77 |
| 3.6  | Compartimiento lateral del tanque   | 77 |
| 3.7  | Frascos de vidrio para la recolección de muestras   | 78 |
| 3.8  | Guantes resistentes al calor  | 79 |
| 3.9  | Lentes de protección y tapones para oídos   | 79 |
| 3.10 | Almacenamiento de frascos para su traslado a laboratorio  | 80 |
| 3.11 | Metodología de muestreo y análisis de bagazo de cerveza. Fuente propia  | 81 |
| 3.12 | Bagazo de cerveza almacenado en bolsa y trasladado en cubeta  | 82 |
| 3.13 | Almacenamiento de muestras de bagazo de cerveza   | 83 |
| 3.14 | Comportamiento de generación de metano de nejayote, bagazo de cerveza y codigestiones de ambos residuos.            | 90 |
| 3.15 | Generación de metano a partir de la generación mensual de bagazo de cerveza de la cervecería artesanal del estudio. | 91 |
| 3.16 | Generación de metano a partir de la generación mensual de nejayote de la empresa de nixtamalización.                | 92 |
| 3.17 | Generación teórica de biometano en los casos de estudio.  | 98 |
| 3.18 | Impacto ambiental en los diferentes casos de estudio.   | 99 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.19 | VAN de todos los casos en el escenario 1. Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %).                                  | 104 |
| 3.20 | TIR de todos los casos en el escenario 1. Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %).                                  | 105 |
| 3.21 | Periodo de recuperación de inversión de todos los casos en el escenario 1. Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %). | 106 |
| 3.22 | VAN del caso 1 en el escenario 2. Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.22).  | 108 |
| 3.23 | TIR del caso 1 en el escenario 2. Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.23).  | 109 |
| 3.24 | Período de recuperación de la inversión del caso 1 en el escenario 2. Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.24).  | 110 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.25 | VAN del caso 2 en el escenario 2. Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.25).   | 111 |
| 3.26 | TIR del caso 2 en el escenario 2. Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.26).   | 112 |
| 3.27 | Período de recuperación de la inversión del caso 2 en el escenario 2. Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.27).   | 113 |
| 3.28 | VAN del caso 3 en el escenario 2. Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.28).                                     | 114 |
| 3.29 | TIR del caso 3 en el escenario 2. Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.29).                                     | 115 |
| 3.30 | Período de recuperación de la inversión del caso 3 en el escenario 2. Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.30). | 116 |

# LISTA DE TABLAS

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.1  | Clasificación general de los Residuos Sólidos (Castells, 2012).   | 27  |
| 2.2  | Indicadores de DQO de la calidad del agua (CONAGUA, 2020).  | 53  |
| 3.1  | Consideraciones para la obtención de costos del proceso de nixtamalización convencional   | 71  |
| 3.2  | Consideraciones para la obtención del impacto ambiental del proceso de nixtamalización convencional.  | 72  |
| 3.3  | Impacto económico y ambiental mensual del proceso de nixtamalización convencional   | 73  |
| 3.4  | Impacto económico y ambiental anual del proceso de nixtamalización convencional   | 73  |
| 3.5  | Normas y métodos de las pruebas fisicoquímicas  | 84  |
| 3.6  | Características del bagazo de cerveza, Co-DA y Nejayote en diferentes proporciones.   | 87  |
| 3.7  | Comparativa de parámetros de caracterización de nejayote con otros estudios.  | 87  |
| 3.8  | Comparación de los resultados de la caracterización fisicoquímica de bagazo de cerveza obtenidos con resultados de literatura.  | 88  |
| 3.9  | Consideraciones para el cálculo de potencial teórico de metano  | 89  |
| 3.10 | Caso 1: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de digestión anaeróbica del nejayote generado por la empresa de nixtamalización analizada.                      | 95  |
| 3.11 | Caso 2: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de codigestión anaeróbica del nejayote y bagazo de cerveza generado en las empresas involucradas en el estudio. | 96  |
| 3.12 | Caso 3: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de codigestión anaeróbica utilizando la proporción óptima determinada de nejayote:bagazo de cerveza (75:25).    | 97  |
| 3.13 | Evaluación del VAN para los diferentes casos y escenarios estudiados.   | 116 |
| 3.14 | TIR para los diferentes casos y escenarios estudiados.  | 117 |
| 3.15 | Período de recuperación para todos los casos y escenarios estudiados.   | 117 |

# Capítulo 1

## Introducción

El agua es un recurso esencial e indispensable para la vida de todos los seres vivos, y es fundamental que se mantenga en condiciones óptimas para su uso sostenible; sin embargo, su disponibilidad ha disminuido progresivamente. Son alrededor de 3,000 millones de personas en el mundo que no cuentan con los recursos hídricos óptimos, lo que a su vez ha ocasionado muertes por consumo de agua no segura para la salud (Ehtisham et al., 2025). En este contexto, y sumando las proyecciones para el año 2050, donde se sugiere que la población aumentará hasta los 9,700 millones de personas, la escasez de agua resulta en un desafío principal para la sostenibilidad. Esta situación es consecuencia, en gran medida, del crecimiento poblacional y de la gestión ineficaz del recurso en diversos sectores urbanos, especialmente en el sector industrial, que ha implementado modelos económicos lineales en sus procesos de producción (Balbinoti et al., 2023).

El modelo de economía lineal genera grandes cantidades de residuos debido a su enfoque en la extracción intensiva de recursos naturales, producción masiva y desecho de productos. Este modelo ha degradado los ecosistemas y priorizado el beneficio económico sobre la sostenibilidad ambiental y social, lo que ha derivado en la explotación insostenible de recursos finitos, como el agua y los combustibles fósiles (Salvador et al., 2021). La industria del cemento es un ejemplo del debate sobre el uso de energía debido a su dependencia de combustibles fósiles. Al tratarse de un material ampliamente utilizado en la construcción, su producción ha representado un consumo energético considerable y un aumento significativo de emisiones de CO<sub>2</sub>e desde 2015 (Kasaeian et al., 2025). Otro ejemplo es la industria vinícola, que utiliza alrededor del 75 % de la producción agrícola de uva. Durante el proceso de elaboración del vino, se generan residuos totalmente orgánicos, que representan entre el 20 % y el 30 % del peso total e incluyen azúcares, fibras, compuestos fenólicos, pigmentos, entre otros. Además, esta industria enfrenta problemas relacionados con el uso insostenible de recursos hídricos, generando aguas

residuales como subproducto, lo que impacta significativamente tanto al medio ambiente como a la economía asociada (Nirmal et al., 2025).

Hoy en día, la búsqueda de la sostenibilidad es un desafío fundamental para asegurar la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras (Fraume, 2006). En este contexto, el desarrollo de proyectos debe tomar en cuenta los aspectos económicos, sociales y ambientales. La economía circular busca extender la vida útil de los recursos mediante su reutilización en otros procesos (Salvador et al., 2021). Un ejemplo es la Simbiosis Industrial (SI), en la cual una industria puede utilizar los subproductos o residuos de otra, reduciendo la dependencia de recursos naturales vírgenes y disminuyendo los desechos generados (Qiu et al., 2024). Países como Dinamarca han implementado con éxito proyectos de simbiosis industrial (SI), basados en el aprovechamiento de desechos. En estos proyectos, el vapor generado por una planta eléctrica es suministrado a una refinería y a una planta farmacéutica de la ciudad. Este vapor se utiliza en procesos clave, como la destilación para la separación del petróleo crudo y la generación de energía eléctrica y térmica, así como en el mantenimiento de condiciones térmicas necesarias para la producción de medicamentos. Por otro lado, la energía térmica de los generadores de la planta eléctrica, son empleados en la calefacción de la ciudad. Finalmente, el uso de aguas tratadas en la planta eléctrica (hidroeléctrica), redujo el consumo de agua en un 60 %. El no aprovechamiento de estos recursos conlleva consecuencias negativas, como el desperdicio de la energía generada, lo que obliga a las empresas a recurrir a mayores cantidades de energía y recursos para realizar las mismas actividades. Esto, a su vez, incrementa los costos operativos y genera una mayor cantidad de residuos. Por el contrario, el uso de herramientas como la simbiosis industrial (SI) en Dinamarca ha permitido una reducción significativa de sus emisiones de carbono y de su huella ambiental, al optimizar el consumo de recursos y mejorar la eficiencia energética. Este modelo ha promovido una mayor eficiencia energética, la reutilización de subproductos entre empresas y la disminución de la dependencia de fuentes de energía externas, lo que ha resultado en una menor emisión de gases de efecto invernadero. Además, la simbiosis industrial ha favorecido la creación de un ecosistema local más sostenible, promoviendo la economía circular y mejorando la competitividad de las empresas, mientras se conservan recursos naturales esenciales (Pinzon, 2009).

En el caso específico de los residuos orgánicos, se han desarrollado alternativas tecnológicas para su aprovechamiento energético. Tratamientos como la digestión anaeróbica son soluciones sostenibles que pueden generar ahorros significativos para las industrias que los implementen. Este proceso convierte los residuos orgánicos en biogás, que puede usarse como fuente de energía térmica o eléctrica, y en biofertilizantes

que enriquecen los suelos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. Países como Alemania y Estados Unidos han integrado ampliamente la digestión anaeróbica (DA) en sus plantas de tratamiento de residuos orgánicos, utilizando el biogás generado para disminuir la dependencia de combustibles fósiles (Ibarra-Esparza et al., 2023). En 2015, Alemania contaba con 95 instalaciones de DA destinadas al procesamiento de residuos orgánicos, con capacidades que oscilaban entre 5 000 y 126 000 toneladas anuales. En total, el biogás producido mediante DA en el país generaba 473 GWh/año de energía térmica y eléctrica, lo que representaba el 5 % del consumo energético nacional (Edwards et al., 2015).

Por su parte, en Estados Unidos, entre 2005 y 2015 se instalaron 223 plantas de DA de origen agrícola, de las cuales el 86 % utilizaban desechos de ganado como sustrato principal. Para 2011, se contabilizaban 146 digestores en operación, con una producción total de 478 GWh de bioenergía, de la cual el 89 % se destinaba a la generación de electricidad y el 11 % al abastecimiento de calderas (Edwards et al., 2015).

## 1.1. Problemática y Justificación

En México, existen dos industrias que generan una gran cantidad de residuos orgánicos debido a la alta demanda de sus productos. Por un lado, está la industria de la nixtamalización, que se enfoca principalmente en la producción de tortillas, un alimento básico en la dieta de la población mexicana, con un consumo estimado de 62 kg de tortillas por persona al año, considerando una población de 112 millones de habitantes (Ramírez Araujo, 2019). Esta industria genera como residuos cáscaras de maíz y un agua residual conocida como nejayote; ambos residuos, de no ser gestionados correctamente, pueden producir impactos ambientales negativos. Por otro lado, se encuentra la industria cervecera, donde el consumo per cápita de cerveza en México fue de 68 litros anuales en 2019 (INEGI, 2020), generando grandes volúmenes de residuos como la levadura y el bagazo de malta. Estos residuos, si se aprovechan correctamente, tienen el potencial de convertirse en fuentes de energía renovable o pueden utilizarse para la producción de compost y otros productos sostenibles. La gestión adecuada de los residuos de la industria nixtamalera y cervecera, puede contribuir significativamente a la economía circular y a la reducción de la huella de carbono de estas industrias.

En la industria de la nixtamalización, la materia prima principal es el grano de maíz. El proceso consiste en la cocción del grano en una solución de agua con un porcentaje de hidróxido de cal, normalmente concentrado al 2 %. Esta cocción da lugar a un grano pregelatinizado, ya que el agua, durante la cocción, absorbe nutrientes del grano

que lo endurecen, como el almidón, y también los excesos de cal (García-Depraect et al., 2017; Ramirez & Castro-Muñoz, 2020). Como resultado, se genera un agua residual alcalina con alta carga orgánica, conocida como Nejayote.

La carga orgánica, que se refiere a la cantidad de materia biodegradable contenida en una unidad de volumen, puede medirse a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La DQO se define como la cantidad de materia susceptible de ser oxidada, ya sea orgánica o inorgánica, y se expresa generalmente en mg/L. En el caso del agua, la DQO es un indicador del nivel de contaminación (Li et al., 2017). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) clasifica un cuerpo de agua en excelentes condiciones si su DQO es menor o igual a 10 mg/L (CONAGUA, 2020). El nejayote ha sido reportado por diversos autores con una DQO que varía entre 9,000 y 53,000 mg/L (España-Gamboa et al., 2018; López-Pacheco et al., 2019; Meraz et al., 2016; Valderrama-Bravo et al., 2022). Esta alta carga orgánica, junto con el pH alcalino provocado por el hidróxido de cal utilizado en el proceso de nixtamalización, convierte al nejayote en un agua residual altamente contaminante. Su tratamiento adecuado representa un desafío significativo para mejorar la calidad del agua y mitigar los problemas asociados con su disposición.

En 2012, se reportó que México generó alrededor de 14.4 millones de m<sup>3</sup> de Nejayote al año (Rojas-García et al., 2012). Sin embargo, una estimación propia, considerando los datos de SIAP (2022), indica que para el año 2021 esta cifra aumentó a aproximadamente 36.35 millones de m<sup>3</sup>, lo que evidencia una problemática creciente y compleja relacionada con la contaminación y el tratamiento de este recurso hídrico. La acumulación de nejayote no solo representa un desafío ambiental, sino también una oportunidad para el aprovechamiento de este residuo mediante tecnologías sustentables como los biodigestores que llevan a cabo el proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás, compostaje entre otras. En este sentido, diversas iniciativas están siendo implementadas en la industria para reducir la generación de nejayote y optimizar su tratamiento, contribuyendo así a una economía circular y a la sostenibilidad de la industria de la nixtamalización.

Por otro lado, la industria cervecera utiliza grano de malta pretriturado combinado con agua para la producción de cerveza. El proceso comienza con la cocción, durante la cual el agua extrae los azúcares necesarios, lo que provoca la fermentación del grano y la posterior producción de cerveza. Sin embargo, el grano utilizado en este proceso no se reutiliza, generando un residuo conocido como bagazo de cerveza (Lima Moraes dos Santos et al., 2023).

De manera general, en la producción de cerveza se estima que por cada 1,000 toneladas de producto generado, se producen entre 137 y 173 toneladas de residuos. De estos, aproximadamente el 85 % corresponde al bagazo de cerveza, un subproducto rico en materia orgánica y altamente biodegradable (Caliskan et al., 2014; Reinold, 1997).

En México, la industria cervecera alcanzó una producción de 134.7 millones de hectolitros en 2021 (Cerveceros de México, 2022). Además, la producción de cerveza ha mostrado una tendencia creciente, con un aumento del 13.5 % en 2022 en comparación con 2020 (Cerveceros de México, 2022).

Con base en estas estimaciones generales del proceso productivo, se calcula que en 2021 México generó aproximadamente 1.58 millones de toneladas de bagazo de cerveza. Si este residuo no se maneja adecuadamente, su acumulación puede contribuir a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), aumentando la contaminación ambiental debido a su alta carga orgánica y rápida degradación.

La alta carga orgánica de ambos residuos (nejayote y bagazo de cerveza) representa un riesgo contaminante si se exponen al ambiente. Sin embargo, esta característica también representa una oportunidad para su tratamiento y gestión mediante el proceso de Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA), que consiste en la degradación simultánea de dos o más residuos orgánicos en ausencia de oxígeno. Este proceso, al combinar las propiedades de los dos residuos, genera una mayor estabilidad en el sistema y mejora la eficiencia en la producción de biocombustible (biogás) y fertilizante orgánico (bioabono) (Mata-Alvarez et al., 2000). La Co-DA no solo contribuye a la reducción de la contaminación, sino que también permite la valorización de residuos, transformándolos en recursos valiosos como biogás, que puede ser utilizado para generar energía térmica y/o eléctrica, y bioabono, que puede sustituir fertilizantes químicos en la agricultura.

Aunque existen antecedentes, que por separado aplican la Digestión Anaeróbica (DA) para el tratamiento del nejayote y el bagazo de cerveza, no se ha registrado el uso de Co-DA para tratar los dos residuos juntos, lo cual podría mejorar la eficiencia en la producción de biogás. Ambos residuos presentan un alto porcentaje de humedad: el nejayote tiene aproximadamente un 97.7 % de humedad, mientras que el bagazo de cerveza cuenta con un 75 % (Castro-Muñoz et al., 2019; Lima Moraes dos Santos et al., 2023). Esta característica los hace adecuados para su tratamiento mediante Co-DA. Sin embargo, el nejayote presenta un pH alcalino, que varía entre 9.8 y 13.1 (Del Angel-Acosta et al., 2021; García-Depraect et al., 2017; López-Pacheco et al., 2019; Meraz et al., 2016; Valderrama-Bravo et al., 2012). Por otro lado, el bagazo de cerveza

tiene un pH ácido , que oscila entre 5.8 y 6.6 (Bougrier et al., 2018; Lima Moraes dos Santos et al., 2023; Szaja et al., 2020). Estos extremos en los niveles de pH pueden inhibir el proceso de DA, reduciendo la efectividad en la producción de biocombustibles. Sin embargo, si ambos residuos se combinan en una proporción adecuada en el proceso de Co-DA, es posible que se logre una neutralización natural del pH, sin la necesidad de utilizar estabilizadores químicos.

Con base en las características fisicoquímicas del nejayote y el bagazo de cerveza, se espera que la Co-DA de ambos residuos sea una alternativa viable para el tratamiento sostenible de estos. Con esta investigación se espera obtener resultados teóricos sobre la generación de biogás y rendimiento de metano. Estos resultados permitirán evaluar la viabilidad tecnoeconómica y ambiental de dicho tratamiento, reducir los costos de producción en el proceso de nixtamalización, y abrirán las puerta a nuevas aplicaciones industriales sostenibles como alternativas de SI.

En este contexto, la industria cervecera se beneficiará al disponer de manera más eficiente de su residuo principal, el bagazo de cerveza, mediante su tratamiento conjunto con el nejayote en la Co-DA. Este enfoque mejorará el tratamiento de aguas residuales y potenciará la generación de biogás rico en metano, el cual podrá ser utilizado como biocombustible en ambas industrias, favoreciendo una economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

## **1.2. Antecedentes**

Como se mencionó previamente, el nejayote representa un desafío significativo en el tratamiento de aguas residuales debido a sus características, como el pH, DQO y la temperatura de salida durante el proceso. Estas propiedades generan distintos impactos negativos en cadena, como la escasez de agua, altos costos económicos para las industrias generadoras y mayor consumo energético para las plantas de tratamiento (Maldonado et al., 2025). Por ello, el tratamiento del nejayote es un área activa de investigación, cuyo principal objetivo es la reducción de carga orgánica, y a su vez, el aprovechamiento de los sólidos separados.

A lo largo del tiempo, se han estudiado diversas alternativas para tratar esta agua residual, incluyendo métodos mecánicos, químicos y biológicos.

El tratamiento mecánico más utilizado para el nejayote es la filtración, que consiste en hacer pasar el flujo de este residuo a través de una membrana que retiene los sólidos

presentes. En 2012 se aplicó este método, logrando reducir la DQO del nejayote de 40,058.14 a 21,783.68 mg/L, obteniendo una efectividad del 50 % (Valderrama-Bravo et al., 2012). Ocho años después, se implementó un proceso de ultrafiltración, que resultó ser más eficiente. El método incluye múltiples etapas de filtración, eliminando sólidos de tamaños progresivamente pequeños obteniendo un permeado (agua tratada) en mejores condiciones que las obtenidas con la filtración convencional (Buitimea-Cantúa et al., 2020). Como se ha mencionado, el objetivo principal de estos tratamientos es preservar el recurso hídrico, permitiendo su reutilización o devolución al sistema de drenaje en condiciones adecuadas. Sin embargo, los sólidos retenidos en el proceso de filtración representan otro desafío. Por esto, se han analizado para evaluar su potencial uso en alimentos y fármacos. Esos estudios han demostrado que los sólidos del nejayote pueden aprovecharse en el sector alimenticio, aportando nutrientes a productos como panes, tortillas, galletas, entre otros. También pueden utilizarse en la industria farmacéutica como antioxidantes (Acosta Estrada et al., 2020; Asaff Torres & Reyes Vidal, 2019; Asaff Torres et al., 2012).

En cuanto a los tratamientos químicos, se pueden identificar dos procedimientos principales. Uno de ellos consiste en la reacción de un agente químico que, al entrar en contacto con el nejayote, actúa como agente coagulante y floculante, uniendo a los sólidos presentes en el agua residual y facilitando su extracción. Este método se ha empleado en refinерías, fundiciones y en el procesamiento de alimentos. En el caso del nejayote, se ha logrado una reducción de contaminantes de hasta un 70 % (García-Zamora et al., 2015). En 2016, un estudio evaluó el costo-beneficio de este tipo de tratamiento, reportando que el gasto del agente químico fue de 18 dólares diarios en un proceso de nixtamalización convencional (Meraz et al., 2016).

Una patente titulada “Proceso para el tratamiento del nejayote por electrocoagulación” utiliza las etapas de sedimentación, electrocoagulación y recirculación de sólidos en el proceso de nixtamalización. Este método compara los valores iniciales y finales de la DQO, mostrando una reducción significativa. Se realizaron tres pruebas, cuyos resultados fueron similares, con un porcentaje de reducción de DQO aproximadamente del 98.7 % (Rivero Martínez et al., 2020). Sin embargo, este procedimiento se llevó a cabo a escala de laboratorio y no se ha mostrado los costos operativos del tratamiento a escala industrial.

Por último, los tratamientos biológicos se basan en la degradación de materia orgánica. Entre estos se encuentra el proceso aeróbico, que se realiza en presencia de oxígeno y da como resultado biomasa y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Un estudio implementó este procedimiento utilizando biorreactores de columna de burbujas caracterizados

por una reacción gas-líquido. Para estabilizar el sistema se añadieron sulfato y fosfato, logrando una eficiencia del 87.6 % en reducción de contaminantes (Salmerón Alcocer et al., 2003). Aunque el agua tratada mediante este método requiere de un proceso de purificación adicional para su reutilización, la cantidad de contaminantes reducidos es significativa, lo que simplifica el postratamiento en comparación con el tratamiento inicial del nejayote. No obstante, debido a la alta carga orgánica del nejayote, los métodos aeróbicos pueden ser muy costosos y generan grandes volúmenes de lodos aeróbicos, los cuales también necesitan tratamiento para su disposición.

Otro estudio emplea microalgas en un procedimiento basado en la absorción de nutrientes presentes en el agua residual. La alimentación de las microalgas se realiza mediante una combinación sinérgica de aguas residuales porcinas y nejayote, en una proporción de 25 % para cada una, complementada con un 50 % de agua. Esta mezcla logró una reducción de contaminantes del 96 % (López-Pacheco et al., 2019). Los resultados obtenidos demuestran que este procedimiento es una opción viable para el tratamiento del nejayote; sin embargo, la proximidad entre una industria porcina y una industria alimentaria dedicada a la nixtamalización puede no ser ideal, debido a la naturaleza de los residuos generados en las granjas porcinas. Esto implica que uno de los residuos tendría que ser transportado a otro sitio, lo que incrementaría los costos operativos y reduciría la viabilidad de este tratamiento. Además, no solo se tendría incremento de costo operativo, sino que también puede ser contraproducente debido a los riesgos de fugas y el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>e contaminantes asociadas al transporte. Si bien una red de tuberías podría resolver este problema, la construcción de una infraestructura de alcantarillado entre industrias porcinas y alimentarias sería poco viable, tanto por los costos como por las distancias involucradas.

Por otro lado, se encuentran los tratamientos basados en la DA y Co-DA. Como se ha mencionado anteriormente, estos procesos aprovechan la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando productos de valor agregado, como biocombustibles y sólidos estabilizados que pueden emplearse para enriquecer suelos.

Un estudio comparó la DA del nejayote con la Co-DA, utilizando agua residual de cervecería para la producción de biohidrógeno. Se evaluaron distintas proporciones de mezcla y se analizó el cambio de pH, desde el obtenido hasta su ajuste a pH 6. El mayor consumo de DQO del 26.1 % ( $\pm$  2.3 %), se registró con un pH ajustado que finalizó en 4.7, en una proporción de 80:20 correspondiente a nejayote y agua residual de cervecería respectivamente. Por otro lado, la producción máxima de biohidrógeno se obtuvo en la DA del nejayote, con un volumen de 302 ml. Sin embargo, la Co-DA

también logró resultados destacados, logrando un volumen de 270 ml en una proporción de 60:40 correspondiente a nejayote y agua residual de cervecería respectivamente, lo que representa un rendimiento competitivo en comparación con la DA (Del Angel-Acosta et al., 2021).

Un estudio similar sobre DA y Co-DA con nejayote y vinaza para la producción de biohidrógeno, realizó un ajuste de pH a 5.5. El mayor porcentaje de eliminación de DQO del 27.5 %, se obtuvo con una proporción de 80:20 correspondiente a vinaza y nejayote respectivamente, que también registró el mayor volumen acumulado de biohidrógeno alcanzando 3291 ml. En contraste, la DA de ambos residuos no generó producción de biohidrógeno, atribuido a la falta de micronutrientes como Fe 2+, Na+ y Mg 2+, así como a un desequilibrio en la relación de Carbono/Nitrógeno/Fósforo (García-Depraect et al., 2017). Ferreira-Rolón et al. (2014) reportaron una eficacia superior al 90 % en la eliminación de DQO del nejayote al alimentar CO<sub>2</sub> en un reactor de manto de lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB). Este alto porcentaje de eliminación de DQO se atribuyó a la precipitación de iones de calcio (Ca 2+) provocada por el burbujeo del CO<sub>2</sub>. Aunque el enfoque de DA demostró ser eficiente para la eliminación de DQO, se concluyó que es necesario implementar un proceso adicional para alcanzar una eliminación óptima. Otra investigación evaluó el potencial de producción de metano a partir del nejayote mediante un tratamiento de DA en dos fases. Para optimizar la fase acidogénica se utilizó un reactor anaerobio de columna (APCR), mientras que un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) se empleó para mejorar el proceso metanogénico. Este sistema demostró ser altamente eficiente, logrando una eliminación de DQO del 96 % y alcanzando un contenido de metano del 84 % en el biogás generado. El rendimiento de metano fue de 282 L/kg DQO, a partir de una carga orgánica de 1.9 g DQO/Ld (España-Gamboa et al., 2018).

Si bien los tratamientos químicos y mecánicos son eficaces en la eliminación de contaminantes, presentan elevados costos operativos a largo plazo debido al mantenimiento constante y la compra de productos químicos y filtros. Además, los métodos no incluyen etapas que involucran degradación de materia orgánica contenida en los sólidos, lo que implica que, aunque se resuelve el problema del agua, los sólidos removidos requieren un tratamiento adicional. En este contexto, la digestión anaeróbica emerge como una opción más eficiente, ya que no solo permite tratar tanto el agua como los sólidos en un único proceso, sino que también contribuye a la degradación de materia orgánica presente, generando biogás como un subproducto. Este enfoque integrado no solo optimiza el tratamiento, sino que también proporciona un valor añadido en forma de energía renovable.

Sin embargo, en esta tecnología es necesario estabilizar el pH para crear un entorno adecuado para las bacterias metanogénicas. El nejayote, al presentar un pH alcalino, puede beneficiarse de la adición de un residuo con pH ácido, que además sea un residuo orgánico con potencial para la co-digestión anaeróbica. Un ejemplo de este tipo de residuo podría ser el bagazo de cerveza.

El bagazo de cerveza, al ser el residuo más abundante del proceso de producción cervecera, ha impulsado la búsqueda de alternativas para su aprovechamiento, con el objetivo de evitar su disposición en vertederos, lo cual contribuye a la emisión de GEI y otros impactos negativos en el ambiente (Ferreira et al., 2019).

El bagazo de cerveza ha sido estudiado para evaluar sus posibles usos en diversos sectores de la salud. Uno de los enfoques principales se centra en sus compuestos bioactivos, los cuales ofrecen beneficios para la salud humana al actuar como antioxidantes, anti-alérgicos, antiinflamatorios y antimicrobianos, con el objetivo de contribuir a la prevención de enfermedades como la diabetes y el cáncer (Patrignani et al., 2021). Se han empleado métodos de extracción asistida por microondas, reacciones enzimáticas y procesos alcalinos para obtener los antioxidantes del bagazo de cerveza, representando una alternativa prometedora debido a que los compuestos comerciales actuales suelen ser costosos (Mussatto et al., 2013).

A su vez, debido a su alto contenido de componentes nutritivos, el bagazo de cerveza ha sido utilizado como fuente de alimento para animales como aves de corral, cerdos y peces. Además representa una opción más económica a diferencia de otro tipo de alimentos comerciales y ofrece beneficios en la cría de los animales, como aumento en producción de leche (Emmanuel et al., 2022). Sin embargo, la demanda de este tipo de alimento para ganado es baja en relación con la cantidad de bagazo de cerveza producido, lo que resulta en su disposición en vertederos (Castro et al., 2023).

En cuanto a la utilización energética del bagazo de cerveza, los principales procesos para su aprovechamiento son la DA, debido a su alto contenido de humedad (75 %) y su alta DQO (72,623 mg/L). Sin embargo, presenta un pH bajo, que varía entre 5.8 y 6.6 (Bougrier et al., 2018; Lima Moraes dos Santos et al., 2023; Szaja et al., 2020), lo que dificulta el tratamiento. Para superar esta limitación y maximizar el aprovechamiento energético de este residuo, se ha explorado la Co-DA del bagazo de cerveza con otros residuos, como estiércol de vaca, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros. El uso del biogás generado a partir de la Co-DA del bagazo de cerveza como

fuentes de energía térmica o eléctrica bajo el esquema de SI, se visualiza como una opción viable que permite obtener ahorros económicos, energéticos y ambientales (Bougrier et al., 2018; Lima Moraes dos Santos et al., 2023; Szaja et al., 2020; Tewelde et al., 2012).

La implementación de los procesos de DA y Co-DA, dependiendo de la tecnología implementada, pueden presentar una inversión inicial elevada. Sin embargo, el funcionamiento de estas tecnologías requiere de menos energía, respecto a los tratamientos mecánicos y químicos. Además, la DA y Co-DA son procesos que transforman la materia orgánica en un biocombustible gaseoso y en dos bioabonos sólido y líquido. El biogás puede producir energía eléctrica o térmica; y los bioabonos son productos que sirven para devolver nutrientes a la tierra. Estas características permiten que, derivado de su implementación, sea posible tener reducción de costos en la operación y una recuperación de la inversión inicial.

En este contexto, el proyecto de investigación se enfoca en un estudio tecnoeconómico y ambiental de carácter teórico, basado en la caracterización fisicoquímica de ambos residuos y diversas co-digestiones. El objetivo principal es evaluar la factibilidad del tratamiento de estos residuos mediante Co-DA, así como el posible uso de los productos obtenidos en un proceso de nixtamalización de una empresa de la localidad.

### **1.3. Preguntas de investigación**

- ¿Cuál es la proporción óptima de Co-DA a partir del nejayote y bagazo de cerveza para estimar teóricamente la producción de biogás?
- ¿Qué estrategias pueden implementarse para asegurar una proporción adecuada de Co-DA en el proceso operativo, en caso de que la cantidad de nejayote y bagazo de cerveza generada sea insuficiente?
- ¿Qué estrategias se implementarán para fomentar la simbiosis industrial entre la industria de nixtamalización y la cervecera, maximizando el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados?

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. General**

Evaluar la viabilidad tecnoeconómica y ambiental del tratamiento conjunto de nejayote y bagazo de cerveza mediante Co-DA, con el fin de estimar la producción teórica de

biogás.

### **1.4.2. Específicos**

- Recopilación, procesamiento y análisis de la información bibliográfica, sobre los tratamientos aplicados del nejayote y bagazo de cerveza.
- Recopilación, procesamiento y análisis de información bibliográfica sobre estudios de viabilidad tecno-económica y ambiental del proceso de Co-DA.
- Caracterización fisicoquímica del nejayote, del bagazo de cerveza y la Co-DA entre ambos residuos.
- Propuesta de rediseño del sistema convencional de nixtamalización, incorporando el proceso de Co-DA.
- Comparación técnica, económica y ambiental entre el proceso convencional de nixtamalización y su variante con la generación de metano a partir del nejayote y bagazo de cerveza.

## **1.5. Hipótesis**

El potencial de generación de metano a partir de la Co-DA entre nejayote y bagazo de cerveza, presenta viabilidad técnica, económica y ambiental para ser implementado en un proceso de nixtamalización particular.

## **1.6. Metodología**

El propósito de esta investigación es realizar un estudio tecnoeconómico y ambiental del proceso de nixtamalización, enfocado en el tratamiento del nejayote y el bagazo de cerveza mediante su Co-DA. El análisis tiene un enfoque mayormente teórico, incluyendo pruebas de caracterización fisicoquímica de los residuos, cuyos resultados serán comparados con la información disponible en la literatura. Se busca aportar conocimiento sobre la generación teórica de biogás y analizar la posible reducción de costos económicos, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de nixtamalización convencional. Para ello, se revisarán antecedentes relacionados con las alternativas de tratamiento y disposición del nejayote y el bagazo de cerveza, además de identificar los retos, ventajas y desventajas de los tratamientos previos. Cabe destacar que el estudio económico se limita a los costos relacionados al equipamiento y operación de la implementación del proceso de Co-DA para el tratamiento del nejayote y bagazo de cerveza, excluyendo otras cuestiones

relacionadas con el giro empresarial. Con este estudio de prefactibilidad económica, se puede visualizar la pertinencia de llevar a cabo una SI entre la industria nixtamalera con la de la cerveza artesanal.

La metodología de este estudio se basa en un enfoque cualitativo y cuantitativo, que permitirá evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza

Las etapas de esta investigación se desglosan de la siguiente manera:

- Recopilación, evaluación y análisis de la información bibliográfica.
- Metodología para la caracterización de nejayote y bagazo de cerveza.
- Estimar la generación de biogás a partir de la Co-DA de los residuos en proporciones de 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0 correspondiente a nejayote y bagazo de cerveza respectivamente, considerando la caracterización fisicoquímica.
- Evaluaciones técnicas, económicas, y ambientales del proceso de nixtamalización.
- Evaluación tecnoeconómica, y ambiental del proceso de nixtamalización implementando la generación potencial de biometano calculada.
- Análisis y discusión de resultados.

## **1.7. Resultados esperados de la investigación**

La investigación presentada tiene como objetivo abordar la problemática del tratamiento del nejayote, un residuo relevante para la mitigación de contaminación del recurso hídrico. Sin embargo, es importante señalar que existen limitaciones, y que en este estudio se llevará a cabo un análisis teórico del tratamiento del nejayote y bagazo de cerveza mediante Co-DA, con el fin de evaluar la viabilidad del estudio tecnoeconómico y ambiental del proceso de nixtamalización.

- Con la metodología implementada se espera obtener resultados favorables en la producción teórica del potencial de metano mediante Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza. Los datos obtenidos contribuirán con nuevos conocimientos, los cuales servirán para evaluar la viabilidad de llevar a cabo un proyecto a mayor escala.

- La caracterización fisicoquímica permitirá determinar las dimensiones necesarias para la tecnología a utilizar en un proyecto de este tipo, facilitando así el análisis completo de la viabilidad económica.
- Se desarrollará un esquema para la implementación de un proceso innovador de nixtamalización que utilice biocombustible como energía renovable obtenido de la Co-DA del nejayote y el bagazo de cerveza, alineado con los principios de sostenibilidad.
- Los resultados de esta investigación permitirán avanzar hacia la experimentación a escala laboratorio, bajo las condiciones estudiadas, brindando un respaldo sólido para futuros proyectos de inversión basados en el proceso de Co-DA, para el tratamiento de los residuos orgánicos mencionados.
- Finalmente, los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación, serán analizados y preparados para su publicación en revistas científicas, aportando nuevos conocimientos al área de Co-DA y al tratamiento de residuos orgánicos.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1. Residuos Sólidos y Biomasa

Los impactos ambientales representan una preocupación actual prioritaria en la búsqueda de soluciones a problemas globales. Entre las causas de estos impactos, la generación de residuos ocupa un lugar destacado, influenciada por factores como la cultura del consumismo, la producción en masa, la economía lineal y el crecimiento exponencial de la población. Estos factores contribuyen significativamente a la acumulación de residuos y agentes contaminantes en el medio ambiente.

Los residuos sólidos (RS) se definen como cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo de productos o de su uso en diversas actividades humanas, incluyendo sectores domésticos, industriales, comerciales, institucionales y de servicios (Galvis, 2016). Su impacto directo se manifiesta en la contaminación de cuerpos de agua, aire y suelos, así como en la generación de patógenos y efectos adversos para la salud humana.

Por ello, la gestión integral de los residuos es esencial para alcanzar objetivos de sostenibilidad. De igual manera, es fundamental moderar la generación de residuos, comenzando desde los modelos de producción. Aunque inicialmente los RS se consideran desechos, poseen un potencial significativo para ser aprovechados mediante su reutilización, generando beneficios tanto económicos como ambientales (Galvis, 2016). Para lograr este aprovechamiento, es crucial identificar y clasificar los diferentes tipos de residuos sólidos disponibles, utilizando sistemas de clasificación específicos.

### 2.1.1. Tipos de Residuos Sólidos

Los RS pueden clasificarse de manera general como se presenta en la tabla 2.1. Sin embargo, resulta indispensable realizar una clasificación más específica que permita optimizar el aprovechamiento futuro de los diferentes materiales.

Tabla 2.1: Clasificación general de los Residuos Sólidos (Castells, 2012).

| Clasificación de los Residuos Sólidos |  |
|---------------------------------------|--|
| Por sector                            | Residenciales, industriales, institucionales, hospitalarios, de barrido.   |
| Por manejo o disposición              | Comunes y especiales   |
| Por peligrosidad                      |  |
| Tipo de material                      | Residuos de comida y jardín, productos de papel, productos de cartón, plástico, caucho y cuero, textiles, madera, productos metálicos, vidrio, productos cerámicos, ceniza, rocas, escombros, huesos, otros. |

Por lo tanto, su clasificación se basa en criterios como la biodegradabilidad, combustibilidad, reciclabilidad y aprovechamiento (Galvis, 2016). A partir de estos parámetros, se establece la siguiente clasificación:

- Residuos Sólidos Orgánicos (RSO): Este tipo de residuos comprende materiales que originalmente formaban parte de un ser vivo o fueron un ser vivo. Estos se dividen en (Galvis, 2016):
  - Putrescibles: Residuos con un alto contenido de humedad, lo que los hace altamente biodegradables. Entre estos se incluyen residuos forestales o de jardín, residuos animales, residuos de comida, excretas de animales, y residuos agropecuarios e industriales.
  - No putrescibles: Residuos que han sido modificados para reducir su biodegradabilidad, generalmente utilizados para combustión energética. Estos se subdividen en:
    - Naturales: Residuos con bajo contenido de humedad, como papel, cartón, fibras naturales y madera.
    - Sintéticos: Residuos altamente combustibles obtenidos a través de procesos de síntesis, como plásticos.

- Residuos Sólidos Inertes: Provenientes de materiales procesados a partir de minerales utilizados como materia prima. Algunos ejemplos incluyen vidrio, metales, escombros y tierra.
- Residuos peligrosos y no peligrosos: Esta clasificación se basa en las características físicas, químicas y/o biológicas de los residuos. Aquellos considerados peligrosos, debido a su riesgo potencial, deben someterse a tratamientos especiales como incineración o el confinamiento. Por otro lado, los no peligrosos pueden ser reutilizados dependiendo de sus propiedades.
- Residuos Sólidos Urbanos: Corresponden a lo que comúnmente se denomina basura. Estos residuos provienen de las actividades cotidianas de la población y de sectores productivos, y se caracterizan por ser los más visibles debido a su acumulación en las vías públicas. Su origen puede ser doméstico, comercial, industrial o del sector de servicios.
- Residuos Agropecuarios: Son residuos generados, en su mayoría, de manera natural, por lo que suelen ser de origen orgánico. Dentro de esta categoría se incluyen residuos agrícolas, forestales, ganaderos y aquellos provenientes de industrias agropecuarias.

La amplia clasificación de los residuos sólidos permite determinar su destino potencial, ya sea para su reutilización, disposición final, o su aprovechamiento. En el presente trabajo, como se mencionó previamente, se hace énfasis en los residuos sólidos orgánicos, especialmente en aquellos con propiedades biodegradables. Esto se debe a que el bagazo de cerveza, uno de los materiales de estudio, pertenece a esta categoría. La biodegradabilidad es una característica clave que puede ser aprovechada para fines energéticos. En este contexto, surge el concepto de biomasa, que será abordado a continuación.

### **2.1.2. ¿Qué es biomasa?**

La biomasa se define como toda materia generada a partir de procesos biológicos, que a lo largo del tiempo ha sido aprovechada energéticamente por los seres vivos (Nogués et al., 2010). Su uso energético por parte del ser humano se remonta al descubrimiento del fuego, convirtiéndose en un recurso fundamental para la subsistencia de las civilizaciones al proporcionar luz, calor en condiciones de bajas temperaturas, cocción de alimentos, entre otros beneficios (Velázquez Martí, 2018).

Como se ha mencionado, la biomasa es una fuente de energía inagotable debido a que su regeneración ocurre a una velocidad superior a la de su consumo. Esto la clasifica

como una fuente de energía renovable. Además, el proceso de generación de biomasa y los residuos derivados de su aprovechamiento energético son significativamente más limpios en comparación con las fuentes de energía basadas en petróleo y carbón. A partir de la biomasa, es posible producir biocombustibles que pueden ser utilizados para generar calor, el cual, a su vez, puede emplearse directamente o transformarse en otras formas de energía, como mecánica o eléctrica.

### **2.1.3. Ciclo de la biomasa**

La biomasa sigue un proceso cíclico cuya duración varía según el tipo de biomasa. Sin embargo, este proceso es repetitivo, permitiendo la regeneración continua de la materia. Este fenómeno ocurre gracias a la interacción entre producción, consumo y aprovechamiento final de la biomasa (Castells, 2012).

La producción de biomasa tiene su origen en el proceso de fotosíntesis, en el cual la principal fuente de energía es el sol. Las plantas se desarrollan mediante la absorción de carbono, utilizando la energía solar como motor de este proceso (Figura 2.1). Los animales herbívoros se alimentan de estas plantas, transfiriendo dicha energía a través de ciclos alimenticios en diferentes ecosistemas. Así, se transmite la energía necesaria para el crecimiento y desarrollo de organismos a lo largo de las cadenas tróficas, incluidos los animales carnívoros (Velázquez Martí, 2018).

Asimismo, existen organismos microscópicos, como las bacterias, que obtienen su energía mediante la degradación de materia orgánica. Un ejemplo de esto es la biomasa proveniente de un animal que ha completado su ciclo de vida. Durante su descomposición, estos microorganismos generan productos que pueden ser aprovechados por el suelo, contribuyendo a la fertilización y continuidad del ciclo de la biomasa (Velázquez Martí, 2018).

Es importante señalar que la inestabilidad del ciclo de la biomasa puede generar una descompensación o un excedente de componentes, lo que podría impactar negativamente a los ecosistemas. Entre las posibles consecuencias de esta desestabilidad se encuentran el cambio climático y la eutrofización de cuerpos de agua.

El aprovechamiento energético de la biomasa se alinea más estrechamente con los principios de un ciclo natural, en contraste con el ciclo derivado del uso de combustibles fósiles. Esto se debe a que la combustión de biocombustibles no implica la extracción

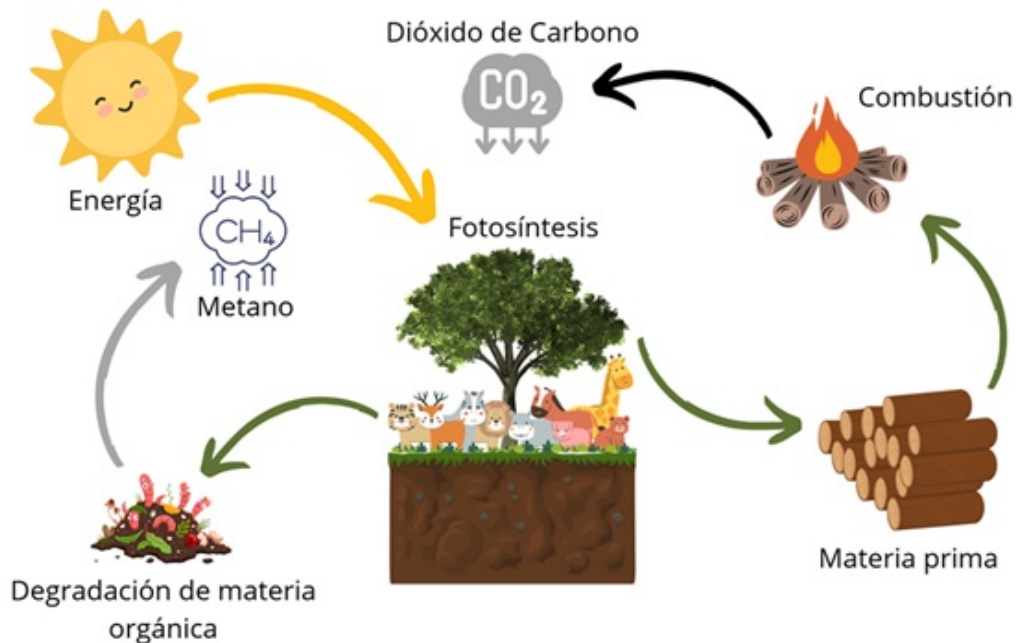


Figura 2.1: Ciclo de la biomasa, elaboración propia a partir de (Velázquez Martí, 2018).

de materia prima adicional, y los gases generados son equivalentes a aquellos liberados por la biomasa degradada de manera natural. Dado que esta biomasa ya se encontraba en interacción con el medio ambiente, su combustión no interrumpe el equilibrio del ciclo natural. Además, los gases generados pueden ser reincorporados al ciclo mediante la fotosíntesis, promoviendo un proceso sostenible.

Un ejemplo destacado de este mecanismo se observa en los cultivos energéticos, que representan un tipo específico de biomasa con alto potencial energético (Fernández, 2003).

#### 2.1.4. Tipos de biomasa

Según lo señalado por Fernández (2003), la biomasa puede clasificarse en dos grupos principales en función de su generación, los cuales son:

- Biomasa Natural: Se origina a partir de procesos biológicos naturales, también asociados con el concepto de espontaneidad de los ecosistemas. Este tipo de biomasa está estrechamente relacionado con los ciclos previamente mencionados, como el ciclo de la biomasa y las cadenas alimenticias.
- Biomasa Residual: Proviene de procesos en los que interviene el ser humano al utilizar la biomasa como materia prima para el consumo. Esta categoría puede clasificarse en (Fernández, 2003):

- Residuos forestales: Proviene de tratamientos silvícolas y de actividades de tala de madera.
- Residuos agrícolas: Incluyen restos de poda de cosechas, rastrojo de cultivos y otros subproductos derivados de actividades agrícolas.
- Residuos de industrias forestales: Generados por actividades industriales como las realizadas en aserraderos y fábricas de pasta y papel.
- Residuos de industrias agrícolas: Comprende subproductos como bagazo, orujos, cáscaras, vinazas, huesos, entre otros.
- Residuos biodegradables: Ejemplos incluyen purines, estiércoles, fangos de depuradora, residuos domiciliarios, subproductos de mataderos, harinas cárnicas, sebos, entre otros.

Cultivos energéticos: Este tipo de biomasa se cultiva específicamente con el propósito de ser utilizada como biocombustible, en lugar de los usos tradicionales que tienen estos cultivos. Ejemplos destacados incluyen el azúcar y el maíz, utilizados para la producción de bioetanol en Brasil y Estados Unidos, respectivamente. Además, otras materias primas como el trigo y la patata también se han empleado para este fin.

Excedentes agrícolas: En ocasiones, la agricultura genera excedentes de producción que pueden ser procesados para su aprovechamiento energético, sirviendo como sustitutos de hidrocarburos y combustibles fósiles. Algunos ejemplos de estos materiales son el aceite de algodón, aceite de soja y aceite de cártamo, los cuales cumplen con esta función.

## **2.2. Generalidades del Agua Residual**

### **2.2.1. Agua Residual**

El agua es un recurso fundamental para las actividades humanas en diversos sectores. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, puede verse afectada por los residuos sólidos generados durante estos procesos, lo que resulta en la contaminación de cuerpos de agua, comúnmente conocidos como aguas residuales (Tchobanoglous, Burton et al., 1998). Por ello es crucial abordar el tratamiento necesario para las aguas residuales derivadas de actividades humanas, dado el impacto negativo que su inadecuada gestión puede ocasionar.

Sabemos que los ciclos naturales de la Tierra mantienen un equilibrio en la transferencia de materia y energía, y el ciclo del agua no es ajeno a este orden natural. Por lo tanto, al intervenir en este ciclo mediante la formación del ciclo urbano del agua, es fundamental

incluir un proceso que permita devolver las aguas residuales a condiciones iniciales o aceptables para su descarga. De no llevarse a cabo este tratamiento, la tendencia sería una contaminación exponencial de los cuerpos de agua y, a su vez, del ambiente. Las aguas residuales pueden contener residuos orgánicos que, al biodegradarse, generan gases malolientes. Además, suelen estar acompañadas de microorganismos patógenos, que son causantes de enfermedades. Igualmente, pueden contribuir al crecimiento de plantas que absorben compuestos tóxicos (Tchobanoglous, Burton et al., 1998). Por lo tanto, es esencial conocer los tipos de aguas residuales, sus características y las tecnologías viables para su tratamiento, asegurando que el proceso esté alineado con un plan de sostenibilidad.

### **2.2.2. Tipos de Aguas Residuales**

Como se mencionó anteriormente, es crucial clasificar las aguas residuales para conocer el rango de sus parámetros y poder aplicar un tratamiento especializado y eficiente, acorde con sus características específicas. Este tipo de aguas residuales se clasifica de la siguiente manera (Tchobanoglous, Burton et al., 1998):

- Agua residual doméstica: No solo proviene de zonas residenciales, sino que también puede originarse en áreas comerciales, públicas, entre otras. Los sólidos en estas aguas provienen de lavabos, retretes, baños, lavanderías, trituradores de basura y ablandadores de agua.
- Agua residual industrial: Como se indica, estas aguas se originan de los vertidos industriales, que generalmente están contaminados por productos químicos, metales pesados, aceites, productos farmacéuticos, entre otros.
- Infiltración y aportaciones incontroladas: Se trata de aguas residuales no deseadas que se infiltran en la red de alcantarillado debido a defectos en la misma, que se desarrollan a lo largo del tiempo.
- Aguas pluviales: Son aguas resultantes de la escorrentía superficial. Estas aguas pueden mezclarse con las del alcantarillado y, dependiendo de su procedencia, pueden presentar características variables, como la presencia de abonos, fertilizantes, aceites, entre otros.

## 2.3. Nejayote un agua residual con alto potencial energético

El tipo de agua residual principal de este estudio corresponde al sector industrial, específicamente en el ámbito de la industria alimentaria. Este tipo de agua residual se caracteriza por su alta carga orgánica y temperatura elevada en las condiciones de efluente del proceso, y es conocido como nejayote. Aunque este tipo de agua contaminada representa una problemática significativa, sus características también permiten identificarlo como un recurso potencialmente aprovechable dentro de un enfoque sostenible. Para ello, es necesario comprender el proceso que origina el nejayote, el cual es la nixtamalización.

### 2.3.1. Nixtamalización

La nixtamalización es un proceso de gran relevancia en México, y que también ha experimentado un notable auge en diversas zonas del norte y centro de América (Rojas-Molina et al., 2007). A pesar de ser una técnica tradicional con siglos de antigüedad, ha evolucionado y se ha perfeccionado con el tiempo, aunque sigue siendo uno de los métodos más comunes para procesar el maíz en la elaboración de alimentos (Méndez-Albores et al., 2004).

La nixtamalización consiste en la cocción del grano de maíz en una mezcla de agua y calcio (este último con una concentración del 2%). La proporción habitual de agua por cada kilogramo de maíz es de 2 a 3 litros. Este proceso tiene como objetivo desprender el pericarpio, la capa externa dura del grano de maíz, que está compuesta principalmente por fibra y compuestos fenólicos. El desprendimiento de esta capa permite que la textura del grano se gelatinice parcialmente, lo que facilita su molienda para obtener una masa nixtamalizada. Sin embargo, para lograr este paso, es necesario dejar reposar el grano en la mezcla durante un período de 12 a 20 horas (según el método tradicional). Posteriormente, se filtra el agua, separando los residuos sólidos del grano y la cal, y se procede a lavar los granos para eliminar los restos de pericarpio. De esta forma, los granos están listos para la molienda, tras la cual se les da forma según el producto final deseado (tortillas, harina, totopos, entre otros). Finalmente, se hornean y se empaquetan los productos (García-Depraect et al., 2017). En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo más detallado del proceso, aunque en este caso se utiliza una mayor cantidad de agua.

La materia no se crea ni se destruye, solo se transforma (Lavoisier, 1789). Por ello, durante el proceso de nixtamalización, el desprendimiento de las capas del grano de

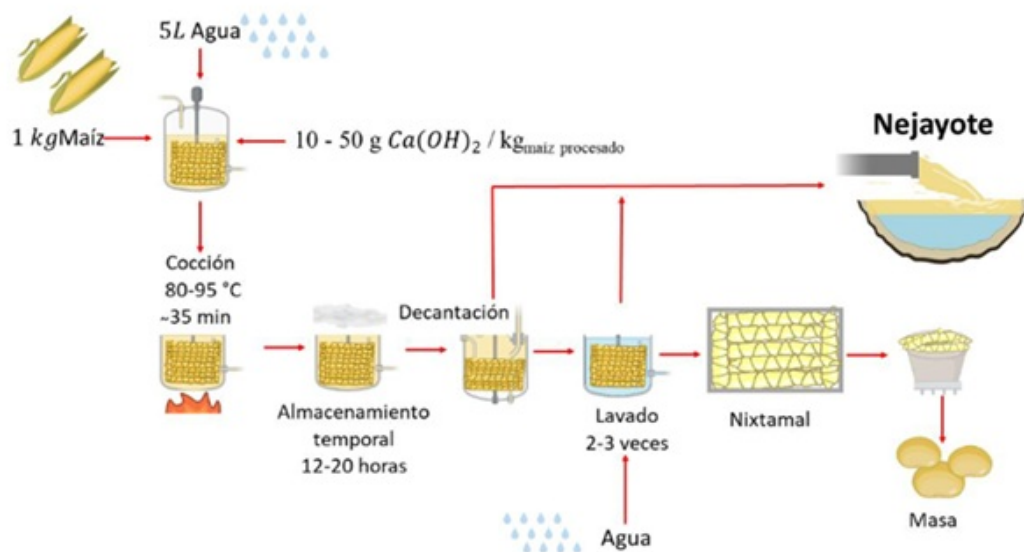


Figura 2.2: Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización (Vázquez-López et al., 2023).

maíz (como el pericarpio y partículas de grano pequeño), junto con los excesos de cal generados en las etapas de cocción y lavado, son absorbidos por el agua utilizada. Esto da lugar a un efluente conocido como nejayote, caracterizado por su alta carga orgánica y un pH alcalino (Valderrama-Bravo et al., 2022).

### 2.3.2. Nejayote

El nejayote es un subproducto agroindustrial líquido, con un nivel de pH alcalino, proveniente del proceso de nixtamalización del maíz. Este residuo consiste en grandes volúmenes de agua desechada, rica en sólidos solubles y suspendidos que se originan principalmente del pericarpio del maíz y del calcio residual de la mezcla. Los sólidos totales presentes en el nejayote lo convierten en una fuente potencial de fitoquímicos con propiedades quimio preventivas (Arriaga González, 2021).

El nejayote puede contener entre un 3.2 % y un 14.5 % de materia seca, de la cual se estima que el 10-30.1 % corresponde a fibra, el 6.4-32 % a almidón, el 1.3-8.9 % a proteínas y el 0.15-5.7 % a calcio (Ramírez & Castro-Muñoz, 2020).

Aunque estos valores ofrecen un panorama general de su composición, en este estudio es crucial analizar otros parámetros específicos como humedad, contenido de sólidos, demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno y carbono, los cuales son esenciales para evaluar su potencial de generación de biogás mediante tecnologías de

digestión anaerobia (DA) o codigestión anaerobia (Co-DA).

El nejayote es considerado un agua residual altamente contaminante debido a su pH alcalino, su elevada demanda química de oxígeno y la alta temperatura a la que se encuentra al salir del proceso, lo que dificulta su disposición convencional (Maldonado et al., 2025). Estas características han impulsado diversas investigaciones enfocadas en desarrollar tratamientos adecuados para este residuo.

Antes de abordar los tratamientos convencionales del nejayote, es fundamental considerar otro proceso industrial, ampliamente practicado tanto en México como a nivel global, que genera grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos. Este residuo, que puede mejorar el tratamiento del nejayote y contribuir a su reutilización, proviene del proceso de producción de cerveza.

## 2.4. Proceso de Producción de Cerveza

El LIPA (2020), describe la elaboración de cerveza como un conjunto cinco etapas principales:

- Molienda y Maceración
- Lavado de granos
- Cocción
- Fermentación
- Maduración y acondicionamiento

La molienda consiste en triturar los granos de malta hasta alcanzar un punto de descarapelado, evitando la formación de harina, pero logrando la ruptura del grano. Este proceso facilita el filtrado de azúcares durante la etapa de maceración. Posteriormente, se lleva a cabo la maceración, generalmente mediante el método de infusión. Este proceso tiene una duración aproximada de 1.5 a 2 horas y puede realizarse mediante dos alternativas: manteniendo una temperatura constante o incrementándola progresivamente, desde los 65 °C hasta los 75 °C.

Una vez finalizado el tiempo de maceración, se procede al lavado de los granos, cuya finalidad es maximizar la extracción de los azúcares adsorbidos. Este proceso comienza con un reposo de la mezcla, permitiendo que los granos gastados se depositen en el fondo y formen una membrana natural en la base de la cámara de maceración.

A continuación, se abre la válvula inferior de la cámara, permitiendo un flujo lento del mosto, mientras los granos permanecen retenidos en la cámara. Tras filtrar la mayor parte del mosto, se añade agua a 75 °C en una cantidad equivalente al 50 % del volumen inicial utilizado en la maceración. Este agua se incorpora en lotes, típicamente en dos o tres etapas: se agrega una primera porción, que luego se filtra, seguida del resto del agua, la cual también se filtra al final. Este proceso asegura un lavado eficiente de los granos y la extracción de los azúcares remanentes.

Una vez finalizada la filtración, se realiza la etapa de cocción, la cual tiene una duración mínima de 1 hora y máxima de 2 horas. Este proceso cumple múltiples funciones, entre las que destacan la esterilización del mosto, ya que, al tratarse de un sustrato rico en nutrientes, puede favorecer el crecimiento de microorganismos no deseados que comprometerían la calidad de la cerveza. Durante esta etapa también se añade el lúpulo, ingrediente responsable de aportar el amargor y el aroma característicos de la cerveza. Además, la cocción facilita la coagulación de proteínas.

Una vez terminada la cocción, se realiza un proceso de centrifugado para concentrar las impurezas en el centro del recipiente, facilitando así la extracción del mosto limpio. Posteriormente, se regula la temperatura a un nivel óptimo para la fermentación, proceso llevado a cabo por la levadura. Al añadir la levadura, esta consume los azúcares presentes en el mosto, produciendo alcohol y dióxido de carbono, lo que permite la carbonatación natural de la cerveza.

La maduración de la cerveza se realiza a bajas temperaturas, específicamente alrededor de 0 °C, lo que favorece la sedimentación de la levadura en el fondo del recipiente, facilitando su extracción. Tras este paso, se lleva a cabo un último filtrado, dejando la cerveza lista para embotellar y ser distribuida al mercado. En la Figura 2.3, se ilustra el proceso completo de producción de cerveza descrito anteriormente.

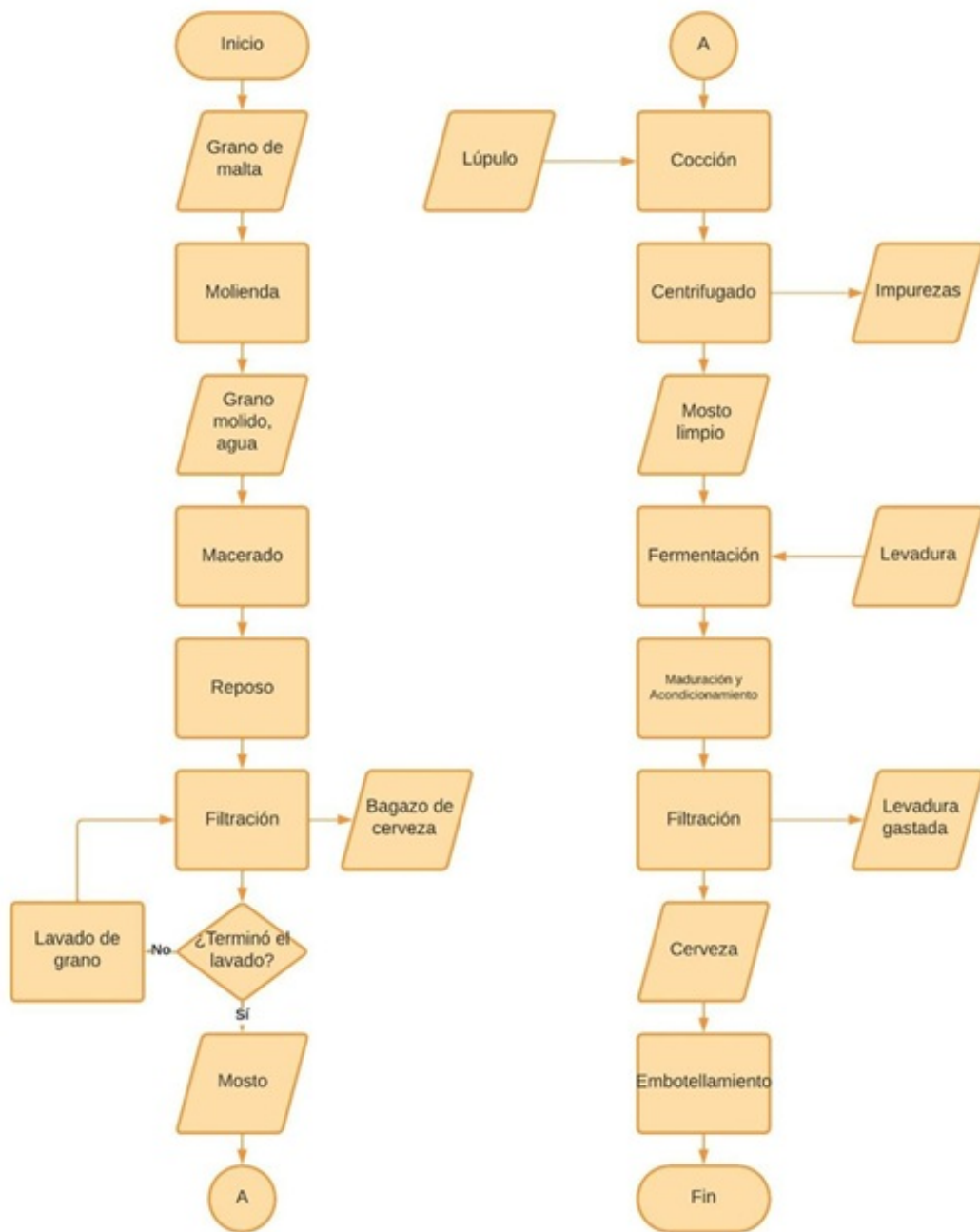


Figura 2.3: Diagrama de flujo del proceso de Producción de Cerveza, Elaboración propia basado en (LIPA, 2020).

A diferencia de la industria del maíz basada en el proceso de nixtamalización, en la producción de cerveza el agua se convierte en el producto principal, mientras que los granos se consideran un residuo. Después de someterlos a procesos como la molienda, maceración y filtrado, se les extrae la mayor cantidad de azúcares posible, quedando desgastados y convirtiéndose en lo que se conoce como bagazo de cerveza.

### **2.4.1. Bagazo de cerveza**

La producción de cerveza, ya sea a nivel industrial o artesanal, genera inevitablemente residuos. Se estima que por cada 1,000 toneladas de producto elaborado, se producen entre 137 y 173 toneladas de residuos, los cuales incluyen bagazo de cerveza, turbio de mosto y levadura de desecho (Caliskan et al., 2014). Entre estos, el bagazo de cerveza representa el mayor porcentaje, alcanzando un 85 % del total (Reinold, 1997).

El bagazo de cerveza contiene varios componentes potenciales para su uso energético, como fibra, hemicelulosa, celulosa, proteínas, lignina, lípidos, almidón residual, minerales y vitaminas, lo que lo convierte en un buen candidato para procesos biotecnológicos (Ribau Teixeira et al., 2020). Como se mencionó anteriormente, los parámetros necesarios para evaluar el potencial del nejayote en un tratamiento de DA, también son relevantes para el análisis de las características fisicoquímicas del bagazo de cerveza, con el fin de proponer una posible Co-DA.

## **2.5. Tratamientos convencionales del nejayote**

Como se mencionó anteriormente, el nejayote ha sido objeto de análisis a través de diversos tipos de tratamiento, los cuales se pueden clasificar en mecánicos, químicos y biológicos. Es importante destacar que, en general, estos tratamientos han tenido dos objetivos principales: el primero es el tratamiento del agua residual para obtener un cuerpo líquido con características adecuadas para su reutilización o para su descarga al alcantarillado; el segundo es aprovechar los sólidos separados del agua para su uso en otros sectores. A continuación, se detallará en qué consiste cada uno de estos tratamientos.

### **2.5.1. Tratamientos Mecánicos**

El tratamiento de aguas residuales mediante filtración por membranas ha sido una tecnología clave para la recuperación de recursos hídricos y su posterior reutilización (Obotey Ezugbe & Rathilal, 2020).

El uso de esta tecnología presenta ventajas en varios aspectos, como el tamaño compacto del equipo y su bajo costo de capital. Sin embargo, uno de los principales desafíos es mejorar la eficiencia, debido a la variabilidad de las características de las aguas residuales. Este desafío está relacionado con el ensuciamiento de las membranas, un área que representa una oportunidad de mejora y que está siendo objeto de investigación en estudios recientes (Obotey Ezugbe & Rathilal, 2020).

En términos conceptuales, la filtración mediante membranas se basa en el flujo del agua residual a través de un sistema que contiene una membrana con poros de diferentes tamaños, según la etapa de clarificación. Estas membranas retienen los sólidos más grandes y permiten la separación del líquido, reduciendo los contaminantes antes de pasar a otra etapa de filtración o al estado final del tratamiento (Tchobanoglous, Burton et al., 1998).

Existen diferentes tipos de tecnologías de filtración por membranas, pero el nejayote ha sido tratado principalmente mediante procesos de separación impulsados por presión, en los cuales las membranas suelen estar fabricadas con polímeros orgánicos sintéticos, como polietileno, politetrafluoroetileno, polipropileno y acetato.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de los poros de las membranas varía según la etapa de filtración. En los tratamientos impulsados por presión, se distinguen cuatro etapas principales (Solís et al., 2017): microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO).

A continuación, se describen las características de estas etapas, clasificándolas según el tamaño de los poros y los sólidos retenidos:

- Microfiltración (MF): El tamaño de los poros varía de 0.05 a 10  $\mu\text{m}$ , y retiene principalmente coloides, grasas, aceites, entre otros contaminantes.
- Ultrafiltración (UF): Con poros de 0.01 a 1  $\mu\text{m}$ , esta etapa retiene mezclas de proteínas, almidones, azúcares, microplásticos, entre otros.
- Nanofiltración (NF): Los poros tienen un tamaño de 0.01 a 0.1  $\mu\text{m}$ , permitiendo el paso de pigmentos, lactosa, sacarosa, cloruro de sodio, entre otros.
- Ósmosis inversa (RO): El tamaño de los poros es de 0.001 a 0.01  $\mu\text{m}$ , eliminando prácticamente todos los contaminantes, incluidos los iones monovalentes. Esta tecnología ofrece una alta eficiencia en la separación de contaminantes; sin embargo, como se mencionó anteriormente, uno de los principales desafíos es el ensuciamiento de las membranas, además del consumo energético asociado a la presión necesaria para el funcionamiento del sistema (Obotey Ezugbe & Rathilal, 2020).

### **2.5.2. Tratamientos Químicos**

Este tipo de tratamientos se basa en la precipitación química, un fenómeno que ocurre mediante la adición de compuestos químicos que reaccionan y modifican el estado

físico de los sólidos disueltos y suspendidos presentes en el nejayote. Los procesos involucrados se conocen como floculación y coagulación.

Durante estos procesos, se acelera la unión de los sólidos, formando agregados o flocúlos que, debido a su peso, se precipitan y sedimentan en un periodo de tiempo más corto. Esta masa voluminosa de sólidos unidos facilita su separación, ya que la reacción actúa de manera eficiente sobre los sólidos suspendidos.

Entre los productos químicos comúnmente empleados en este tratamiento se encuentran el sulfato de alúmina, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso y cal. Este tipo de tratamiento es altamente eficiente, ya que permite clarificar el agua eliminando entre el 80 % y el 90 % de la materia suspendida, el 40 % y el 70 % de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), el 30 % y el 60 % de la demanda química de oxígeno (DQO), y entre el 80 % y el 90 % de las bacterias presentes (Tchobanoglous, Burton et al., 1998). En la Figura 2.4, se presenta un ejemplo de este tipo de tratamiento aplicado al nejayote. En este caso, se utilizó como agente coagulante-floculante el quitosano, un biopolímero extraído de los caparazones de camarón.

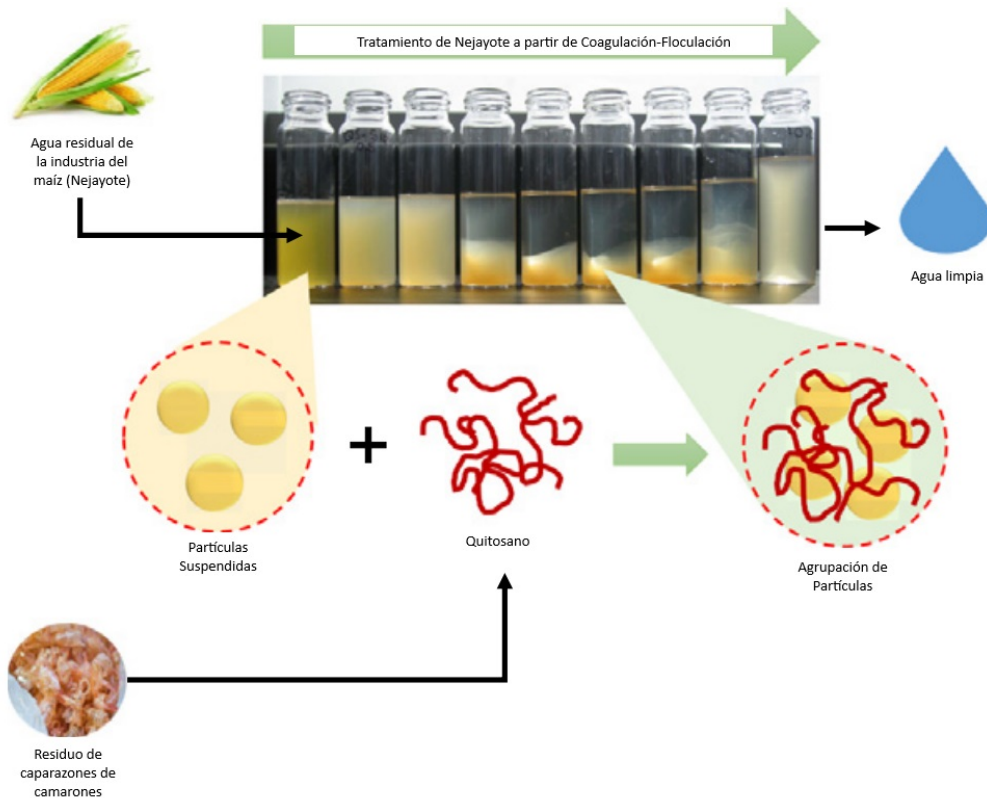


Figura 2.4: Tratamiento de Coagulación-Floculación del Nejayote (Meraz et al., 2016).

### 2.5.3. Tratamientos Biológicos

Estos tratamientos se originan a partir de fenómenos naturales, principalmente mediante la acción de microorganismos, en su mayoría bacterias. De manera general, en estos procesos, las bacterias transforman la materia orgánica en gases y en tejido celular. Este tejido puede eliminarse por decantación, ya que es más denso que el agua.

Es importante destacar que el objetivo del tratamiento biológico varía según el tipo de agua residual que se trate. En el caso de las aguas residuales domésticas, el objetivo es reducir la materia orgánica y eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo. Para las aguas agrícolas, se busca eliminar los nutrientes que contribuyen a la proliferación de plantas acuáticas. En el caso de las aguas industriales, como es el caso del nejayote, el objetivo es la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos (Tchobanoglous, Burton et al., 1998).

Es importante destacar que, para satisfacer las finalidades o necesidades de tratamiento asociadas al crecimiento de los microorganismos, se requieren diversas características nutritivas. En términos generales, estos tratamientos necesitan una fuente de energía, carbono para la síntesis de materia celular, elementos inorgánicos que actúan como nutrientes y componentes orgánicos. Los porcentajes específicos de cada uno de estos parámetros dependen del tipo de tratamiento que se emplee (Tchobanoglous, Burton et al., 1998).

En este contexto, el nejayote ha sido tratado mediante procesos como la digestión aeróbica, el cultivo de microalgas y la digestión anaeróbica.

La digestión aeróbica es un proceso que utiliza microorganismos que requieren oxígeno para su crecimiento.

En el proceso convencional, el reactor opera con un flujo de aire en un tanque abierto, el cual puede aplicarse de forma continua o discontinua. En plantas de menor escala, se utiliza un sistema discontinuo donde los reactores son aireados, y la mezcla se lleva a cabo durante un periodo prolongado. A medida que avanza el proceso, se generan lodos que se sedimentan en el mismo tanque. En sistemas continuos, la decantación se realiza en un tanque independiente (INVENT Umwelt- und Verfahrenstechnik AG, 2024).

Existen otros dos tipos de digestión aeróbica. El primero emplea oxígeno puro en lugar de aire, produciendo lodos con características similares a los obtenidos en los procedimientos convencionales. El segundo tipo utiliza un proceso termófilo, que

presenta un alto rendimiento en la biodegradación de la materia orgánica, con eficiencias superiores al 80 % y un tiempo de retención hidráulica (TRH) corto, de entre 3 y 4 días (Tchobanoglous, Burton et al., 1998).

En el caso del nejayote, se aplicó un tratamiento utilizando biorreactores en cascada, lo que potenció la degradación de la materia orgánica (Figura 2.5).

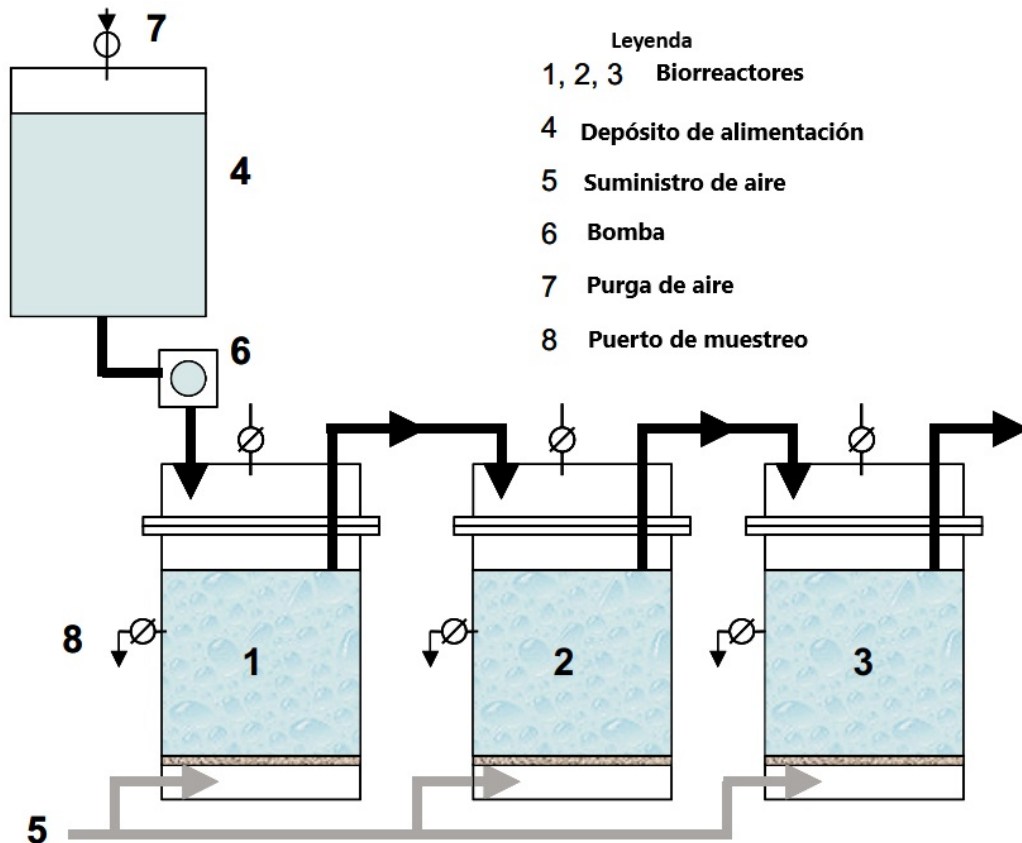


Figura 2.5: Tratamiento de Nejayote a partir de biorreactores aeróbicos en cascada (Salmerón Alcocer et al., 2003).

#### 2.5.4. Digestión Anaeróbica DA

La DA es un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno dentro de un tanque cerrado. En este contexto, la materia orgánica, conocida como sustrato, consiste en una mezcla de sólidos con un alto contenido de humedad (agua). El proceso de DA produce principalmente biogás, una mezcla de gases entre los cuales destacan el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). También están presentes en menores proporciones otros compuestos como hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Además, se genera un residuo sólido que puede ser utilizado como biofertilizante (FAO, 2011).

La obtención de estos productos es posible gracias a una serie de procesos microbiológicos que ocurren dentro del tanque y que degradan progresivamente el sustrato. Estos procesos, denominados hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, son llevados a cabo por diferentes comunidades de microorganismos especializados (FAO, 2011).

## **2.6. Aprovechamiento del bagazo de cerveza: potencial nutricional, componentes bioactivos y uso energético**

El bagazo de cerveza es un residuo lignocelulósico caracterizados por sus capas de la semilla, pericarpio y la cáscara del grano de cebada. Como se ha mencionado anteriormente, es el residuo con mayor porcentaje de generación en el proceso de producción de cerveza, y a su vez, debido al auge de esta industria se genera en grandes cantidades (Mainardis et al., 2024; Naibaho et al., 2025). Se han propuesto distintas alternativas de disposición para este residuo orgánico, como la alimentación animal y humana, extracción de compuestos bioactivos y la producción de energía a partir de biocombustibles. Estas alternativas no solo contribuyen a la reducción de residuos, sino que también promueven la sostenibilidad y la economía circular (Naibaho et al., 2025).

### **2.6.1. Uso del bagazo de cerveza en la alimentación animal**

El bagazo de cerveza ha demostrado ser una alternativa viable como alimento para animales debido a su alto contenido en proteínas y fibra, así como a su bajo costo en comparación con otros ingredientes del mercado convencional (Emmanuel et al., 2022). Se puede utilizar tanto en estado seco como húmedo, aportando aminoácidos esenciales que son fundamentales para el crecimiento y la salud de los animales. Estos nutrientes se presentan en mayor concentración y biodisponibilidad respecto a otros alimentos convencionales, lo que mejora la eficiencia alimenticia (Emmanuel et al., 2022).

En la ganadería, el uso de bagazo de cerveza ha mostrado beneficios como el aumento en la producción de leche, una mayor concentración de sólidos lácteos y una reducción en el contenido de grasa. Estas mejoras han llevado a su incorporación en la dieta de aves de corral, cerdos y peces, optimizando el rendimiento productivo y reduciendo costos alimentarios (Emmanuel et al., 2022; Mussatto et al., 2013).

## **2.6.2. Uso del bagazo de cerveza en la alimentación humana**

El bagazo de cerveza ha sido evaluado como un potenciador nutricional en productos alimenticios humanos debido a su alto contenido en fibra dietética. Se ha utilizado en la elaboración de productos de panadería tales como panes, galletas, muffins, pasteles, waffles, panqueques, tortillas, bocadillos, donas y brownies. Para su incorporación, el bagazo es previamente triturado hasta convertirse en harina (Emmanuel et al., 2022).

Los estudios indican que al sustituir un 10 % de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza en productos como el pan, se logra un incremento del 50 % en el contenido proteico, un 10 % en fibra y un 10 % en aminoácidos esenciales, en comparación con el pan convencional (Emmanuel et al., 2022). Estas mejoras nutricionales contribuyen al desarrollo de alimentos funcionales con efectos beneficiosos en la salud, como la reducción del riesgo de enfermedades crónicas.

Además, la incorporación de bagazo de cerveza en alimentos promueve la biodisponibilidad de compuestos bioactivos, los cuales han ganado interés por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y antialérgicas. Estos compuestos también pueden reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer, lo que refuerza el impacto positivo de este subproducto en la salud humana (Mussatto et al., 2013).

## **2.6.3. Extracción de compuestos bioactivos del bagazo de cerveza**

El bagazo de cerveza contiene compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes, cuyo aprovechamiento ha sido investigado mediante diversos métodos de extracción de compuestos bioactivos (Mussatto et al., 2013). Entre los métodos utilizados se encuentran:

- Extracción sólido-líquido
- Extracción asistida por microondas
- Extracción enzimática
- Extracción alcalina

De estos métodos, el proceso de extracción sólido-líquido ha demostrado ser el más eficiente, utilizando acetona al 60 % (v/v) como solvente, a 60°C durante 30 minutos. Esta técnica optimiza la recuperación de compuestos fenólicos, destacándose como una alternativa prometedora para el aprovechamiento del bagazo de cerveza (Meneses et al., 2013).

Los compuestos bioactivos extraídos no solo poseen aplicaciones en la industria alimentaria, sino que también son altamente valorados en las industrias farmacéutica y cosmética debido a sus propiedades antioxidantes. Considerando que estos compuestos suelen tener altos costos en el mercado, su obtención a partir del bagazo representa una opción económicamente atractiva y ambientalmente sostenible (Mussatto et al., 2013).

## **2.6.4. Producción de energía y biocombustibles**

### **Pirólisis**

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno a temperaturas de 300 a 900°C, generando productos con alta densidad energética (Lima Moraes dos Santos et al., 2023):

- Líquido (bioaceite): Puede refinarse para producir biocombustibles líquidos como el bioetanol.
- Sólido (biocarbón): Utilizado como mejorador de suelos o como fuente de carbono en aplicaciones industriales.
- Gas (syngas): Compuesto principalmente por CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, el cual se utiliza para generación de calor o conversión a energía eléctrica.

El bagazo de cerveza ha sido sometido a pirólisis, mostrando potencial en la producción de biodiésel, como adsorbente para la eliminación de contaminantes y en la industria química y petrolera. No obstante, el biocarbón requiere un postratamiento antes de su aplicación agrícola (Lima Moraes dos Santos et al., 2023).

### **Digestión Anaeróbica**

El bagazo de cerveza, como el nejayote, ha demostrado ser un sustrato con alto potencial para someterlo a procesos de DA, debido a su alto contenido orgánico y de humedad. Esto, eleva su potencial energético, para la producción de biogás rico en metano, y la generación de digestato que puede ser aprovechado como biofertilizante en los suelos (Mainardis et al., 2024).

Este proceso promueve la sostenibilidad y la economía circular debido al aprovechamiento completo de los productos obtenidos (biogás, biofertilizantes, aguas tratadas), como a su vez, la disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al retener el metano generado y combustionarlo (FAO, 2011).

Cuando se compara con la pirólisis, la DA presenta la ventaja de operar a temperaturas

más bajas, lo que se traduce en un menor consumo energético. Además, a diferencia de la pirólisis, cuyos productos como el biocarbón requieren un postratamiento para su uso como biofertilizante, la digestión anaeróbica no genera este tipo de subproductos que demanden un tratamiento adicional, lo que reduce costos operativos adicionales.

En términos de costos de capital, un diario comercial industrial de Estados Unidos estimó en 2013 que las instalaciones de pirólisis de 15 MW tienen un costo de entre \$8,000 y \$11,500 dólares por kW instalado (Global Alliance for Incinerator Alternatives, 2017). En comparación, los proyectos de DA presentan costos de capital que oscilan entre 3,800 y 5,400 dólares por kW, lo que representa aproximadamente la mitad de lo que se invierte en una instalación de pirólisis (Díaz Huerta et al., 2023; Musluoğlu et al., 2025; O'Connor et al., 2023).

Asimismo, el consumo energético en ambos procesos difiere considerablemente. La pirólisis requiere un consumo de 4,916.7 kWh/tonelada, mientras que la DA solo demanda 32.94 kWh/tonelada (Heredía Salgado et al., 2020; O'Connor et al., 2023). Este notable diferencial en consumo energético implica que la DA no solo tiene una inversión inicial más baja, sino que también presenta menores costos operativos a largo plazo, lo que la hace más rentable en términos de eficiencia energética.

En este contexto, el presente estudio se centra en el proceso de digestión anaeróbica, con el objetivo de evaluar cómo los valores nutricionales del bagazo de cerveza pueden potenciar el tratamiento del nejayote. Se espera que este proceso no solo disminuya la carga orgánica del nejayote, sino que, al mismo tiempo, aumente el potencial energético mediante la generación de biogás con un mayor valor metanogénico.

A continuación, se describen las etapas del proceso de digestión anaeróbica, con el fin de detallar los mecanismos involucrados y las interacciones que facilitan este aprovechamiento de recursos orgánicos.

## **2.7. Etapas de la DA**

La FAO (2011), menciona que la digestión anaeróbica se divide en diversas etapas como se observa en la figura 2.6, en las cuales participan distintos microorganismos. Estas etapas pueden ocurrir simultáneamente e incluyen la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

En la hidrólisis, microorganismos hidrolíticos descomponen moléculas orgánicas

complejas en compuestos más simples mediante la acción de enzimas específicas. Este proceso transforma macromoléculas, como carbohidratos y lípidos, en azúcares simples y ácidos, los cuales sirven de sustrato para la etapa siguiente. Durante la acidogénesis, los productos de la hidrólisis se metabolizan para formar ácidos grasos volátiles (AGV). Se ha demostrado que el uso de co-sustratos ricos en lípidos y con bajos niveles de nitrógeno puede aumentar la producción de biogás al reducir la acumulación de AGV. Además, la alcalinidad desempeña un papel crucial en la amortiguación del pH, estabilizando el sistema.

Las últimas dos etapas, acetogénesis y metanogénesis, son determinantes en la producción de biogás y en el rendimiento de metano. La metanogénesis ocurre a través de dos rutas principales:

- Metanogénesis acetoclástica, responsable del 70 % del metano producido, en la cual el metano se genera a partir de acetatos.
- Metanogénesis hidrogenotrófica, que contribuye con el 30 % restante del metano al transformar hidrógeno y dióxido de carbono en metano.

Aunque la ruta hidrogenotrófica genera una menor proporción de metano, su papel es fundamental, ya que el consumo de hidrógeno reduce la acumulación de compuestos inhibidores. Esto ayuda a mantener un pH óptimo para la degradación de la materia orgánica y promueve la producción de un biogás con un alto contenido de metano.

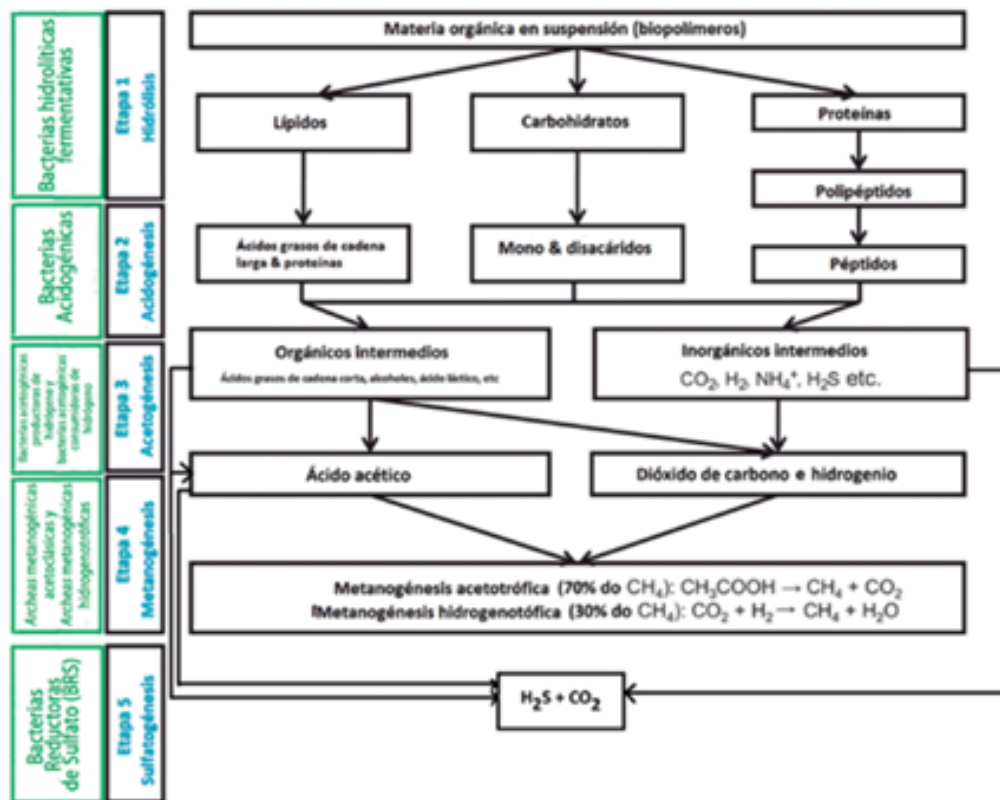


Figura 2.6: Etapas de la Digestión Anaeróbica (FAO, 2011).

## 2.8. Importancia de los sólidos en el sustrato para la DA

La cantidad de sólidos presentes en un sustrato es un parámetro clave para determinar las proporciones óptimas que ingresarán a un biodigestor. Esto se debe a que el contenido de sólidos tiene un impacto directo en la eficiencia de producción de biogás. Es esencial mantener un equilibrio en el porcentaje de sólidos en el sustrato para evitar la saturación de los microorganismos con materia biodegradable (FAO, 2011; Igoni et al., 2008; Paramaguru et al., 2017).

En el caso de las aguas residuales, como el nejayote, estos parámetros no solo reflejan el nivel de contaminación del cuerpo de agua, sino que también permiten estimar el valor energético del sustrato mediante la medición de los sólidos volátiles. Estos sólidos pueden aprovecharse para la generación de biogás, añadiendo valor al proceso.

### 2.8.1. Tipos de sólidos y su medición

- Sólidos totales (ST):

Los sólidos totales representan el porcentaje completo de sólidos presentes en el sustrato, incluyendo tanto el contenido líquido como sólido. En el ejemplo del nejayote, los sólidos totales incluyen el agua (porcentaje de humedad) y los sólidos propiamente dichos. La medición de los sólidos totales se realiza secando una muestra representativa a una temperatura de aproximadamente 100 °C para evaporar el agua según la NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2016).

Un review enfocado en digestores de flujo continuo de tanque agitado (CSTR), recopila información de la literatura donde obtiene datos de condiciones óptimas para este tipo de reactores, donde hace mención a que el rango típico de ST oscila entre 4 % y 10 % (Shah et al., 2024).

- Sólidos volátiles (SV):

Los sólidos volátiles son una fracción de los sólidos totales compuesta por materia susceptible a la volatilización. Estos incluyen principalmente sólidos orgánicos, que son biodegradables por los microorganismos del biodigestor y convertidos en biogás (Laines Canepa, 2013). Para identificarlos, las muestras se someten a una temperatura de  $550 \pm 50$  °C, como es realizado con base a NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2016). A partir de este procedimiento los sólidos orgánicos, son volatizados.

- Sólidos fijos (SF):

Los sólidos fijos son el remanente de los sólidos totales tras la volatilización. Estos sólidos, compuestos mayoritariamente por minerales inorgánicos, pueden utilizarse en el suelo como biofertilizantes tras un pretratamiento adecuado (del M. Chaile et al., 2024).

## 2.9. Balance en el pH y su relevancia en la DA

Como se ha mencionado, la digestión anaeróbica (DA) consta de diferentes etapas en las cuales participan diversas comunidades de microorganismos. Estos microorganismos degradan la materia orgánica y generan productos intermedios que, a su vez, son utilizados por otros microorganismos en etapas posteriores. Para que exista una coexistencia efectiva entre estas fases, es fundamental mantener un equilibrio entre la generación de productos y la capacidad de los microorganismos para degradarlos a una tasa adecuada. Este equilibrio depende, en gran medida, de que el entorno microbiológico

mantenga un pH óptimo para la supervivencia y actividad de los microorganismos (Camarena Martínez et al., 2024).

La sensibilidad de los microorganismos metanogénicos a variaciones en el pH es particularmente relevante, ya que cualquier desajuste puede reducir significativamente la producción de biogás rico en metano (FAO, 2011).

### **2.9.1. Factores que afectan el equilibrio del pH en la DA**

Existen dos escenarios extremos que pueden inhibir el sistema (FAO, 2011; Parra et al., 2014; Solarte Toro et al., 2017):

- Acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV):
  - La acumulación excesiva de AGV, especialmente aquellos de cadenas largas o ramificadas, dificulta su degradación.
  - Esto provoca un aumento en el tiempo necesario para completar la hidrólisis, lo que reduce el pH del sistema.
  - Como resultado, los microorganismos metanogénicos disminuyen su actividad y reproducción, afectando negativamente la producción de biogás.
- Aumento del pH:
  - Un incremento en el pH puede ocurrir cuando los microorganismos metanogénicos han degradado la mayoría de la materia orgánica disponible en el sustrato.
  - Aunque este escenario es menos problemático, señala la necesidad de añadir un nuevo afluente de materia orgánica en proporciones adecuadas para mantener la actividad microbiana.

### **2.9.2. Rangos de pH en las etapas de la DA**

Cada etapa de la DA tiene un rango óptimo de pH para el correcto funcionamiento de los microorganismos (Camarena Martínez et al., 2024):

- Hidrólisis: 6.0 – 8.0
- Acidogénesis: 5.5 – 6.5
- Acetogénesis: 6.0 – 6.2
- Metanogénesis: 7.0 – 7.2

Mantener estos rangos es fundamental para garantizar la eficiencia del proceso y la estabilidad del sistema, misma razón por la cual también es importante realizar el análisis de este parámetro en el nejayote y el bagazo de cerveza. En este trabajo se han realizado los análisis de pH a partir de NMX-AA-25-1984 (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1984).

## 2.10. Temperatura

La temperatura es un parámetro crucial para garantizar el funcionamiento óptimo de la digestión anaeróbica, ya que favorece al metabolismo de los microorganismos responsables de la producción de biogás. Por lo general, estos microorganismos operan en dos rangos principales de temperatura: el rango mesofílico (35 °C) y el rango termofílico (55°C) (Luo et al., 2023).

El empleo de condiciones termofílicas ofrece ciertas ventajas significativas en comparación con las condiciones mesofílicas. Diversos estudios han reportado una intensificación de la actividad microbiana y un aumento en la producción de biogás al operar a temperaturas más elevadas (Bi et al., 2024). Esto se traduce en una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica, lo cual permite optimizar la operación de los digestores mediante la reducción de los tiempos de retención hidráulica. Adicionalmente, las condiciones termofílicas favorecen una eliminación más efectiva de patógenos bacterianos y virales, mejorando la calidad del digestato resultante (Bi et al., 2025).

No obstante, el mantenimiento de temperaturas termofílicas presenta ciertas desventajas. Entre las más destacadas se encuentra el aumento en la demanda energética, debido a la necesidad de suministrar mayor cantidad de calor para alcanzar y mantener dichas temperaturas, en comparación con las condiciones mesofílicas (Abdelrahman et al., 2025).

## 2.11. Importancia de la relación Carbono/Nitrógeno C:N en la DA

La relación Carbono/Nitrógeno (C:N) es un parámetro esencial para mantener un ambiente óptimo en la generación de biogás. Esto se debe a que ambos elementos desempeñan roles fundamentales en el metabolismo de los microorganismos metanogénicos: el carbono actúa como fuente principal de energía, mientras que el

nitrógeno es indispensable para la formación celular (Romero Rodríguez, 2024).

Para el carbono se ha utilizado el Hach Method 10128 como método de análisis, mientras que para el nitrógeno se utilizó el Hach Method 10072.

Un equilibrio adecuado en esta relación favorece el desarrollo estabilizado de los microorganismos, lo que permite maximizar la producción de biogás rico en metano. El rango óptimo de la relación C:N se sitúa entre 20:1 y 30:1 (FAO, 2011).

### 2.11.1. Desequilibrios en la relación C:N

Ruiz Pulgarín (2024), explica los dos extremos de la relación C/N:

- Exceso de carbono:
  - Cuando la relación C:N supera el rango ideal, el nitrógeno disponible no es suficiente para satisfacer la demanda metabólica de los microorganismos.
  - Esto genera un consumo acelerado de nitrógeno, lo que dificulta la transformación del exceso de carbono y afecta negativamente la producción de biogás.
- Exceso de nitrógeno:
  - Cuando la relación C:N es menor al rango óptimo, el aumento de nitrógeno puede conducir a la generación de nitrógeno amoniacal.
  - Este compuesto es precursor de amoníaco, el cual, en concentraciones elevadas, resulta tóxico para los microorganismos metanogénicos, inhibiendo la producción de biogás.

## 2.12. Demanda Química de Oxígeno DQO

En la digestión anaeróbica (DA), hemos analizado diversos parámetros que influyen en el proceso y que deben controlarse para mantener un ambiente óptimo dentro del sistema. Sin embargo, además de un ambiente controlado, es fundamental garantizar la disponibilidad de una fuente de energía para los microorganismos: la materia orgánica presente en los sustratos. Esta materia orgánica es la base del proceso, ya que es degradada y transformada en biogás. La cantidad de materia orgánica en un sustrato puede medirse a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que se define como la cantidad de materia susceptible de oxidación, ya sea de origen orgánico o inorgánico (Li et al., 2017) Este parámetro se expresa en miligramos por litro (mg/L).

### 2.12.1. Calsificación de calidad del agua en función de la DQO

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) clasifica la calidad del agua en función de sus niveles de DQO como se observa en la Tabla 2.2 (CONAGUA, 2020):

- Excelente calidad: Una DQO menor o igual a 10 mg/L.
- Fuertemente contaminada: Una DQO mayor a 200 mg/L.

Esta clasificación es fundamental no sólo para evaluar la calidad del agua, sino también para determinar su viabilidad como sustrato en la digestión anaeróbica, ya que valores elevados de DQO indican una mayor disponibilidad de materia orgánica para el proceso.

Tabla 2.2: Indicadores de DQO de la calidad del agua (CONAGUA, 2020).

| Criterio (mg/L)     | Clasificación   | Color    |
|---------------------|---|----------|
| DQO $\leq$ 10       | Excelente<br>No contaminada.  | Azul     |
| 10 < DQO $\leq$ 20  | Buena calidad<br>Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.   | Verde    |
| 20 < DQO $\leq$ 40  | Aceptable<br>Con indicio de contaminación, aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. | Amarillo |
| 40 < DQO $\leq$ 200 | Contaminada<br>Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.  | Naranja  |
| DQO > 200           | Fuertemente contaminada<br>Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.                     | Rojo     |

Para realizar el análisis de este parámetro, se ha utilizado el Hach Method 8000.

### 2.13. Co-Digestión Anaeróbica Co-DA

La co-digestión anaeróbica (Co-DA) es un proceso similar a la digestión anaeróbica (DA), pero se caracteriza por el uso de dos o más sustratos que interactúan de

manera conjunta. Esta combinación permite aprovechar las propiedades fisicoquímicas complementarias de los sustratos, resultando en una sinergia positiva que incrementa la producción de biogás rico en metano (FAO, 2011).

Entre las ventajas de este proceso está la reducción de efectos inhibidores, como la acumulación de compuestos volátiles, incluidos los ácidos grasos, y las concentraciones excesivas de amoníaco, que pueden afectar negativamente la actividad de los microorganismos. Además, al combinar sustratos con propiedades ácidas y alcalinas en proporciones adecuadas, es posible alcanzar un pH neutral de manera natural, lo cual favorece el equilibrio del sistema.

Por lo tanto, la Co-DA, cuando se utiliza un co-sustrato adecuado, no solo mejora la estabilidad del proceso, sino que también incrementa su eficiencia en comparación con la DA tradicional, contribuyendo a una mayor generación de biogás de alta calidad.

### **2.13.1. Biogás**

El biogás es uno de los productos generados mediante la tecnología de Digestión Anaeróbica (DA); sin embargo, este gas también se forma de manera natural en ciertos ciclos biogeoquímicos. Conocido también como gas natural renovable, el biogás se produce a partir de la degradación de materia orgánica en ambientes con bajos niveles de oxígeno, como en sedimentos acuáticos, suelos húmedos, materia orgánica enterrada, y desechos animales, entre otros (ENRES, 2019).

Además de estos ciclos naturales, existen fuentes no naturales derivadas de actividades humanas, tales como los rellenos sanitarios y las lagunas de aguas residuales. Estas actividades alteran el ciclo natural de los gases, contribuyendo a la acumulación de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, al cambio climático global. Sin embargo, la Digestión Anaeróbica permite aprovechar el biogás generado en estos procesos, almacenándolo de manera controlada para evitar su liberación a la atmósfera (ENRES, 2019).

Este biogás se utiliza en diversas aplicaciones, destacándose la generación de electricidad o energía mecánica, debido a su composición típica: entre un 40 % y un 75 % de metano, el cual es el componente principal para su aprovechamiento energético, y entre un 25 % y un 60 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que reduce el poder calorífico del biogás. También se encuentran otros gases en menor proporción, como sulfuro de hidrógeno, hidrocarburos, amoníaco, vapor de agua, oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno.

Aunque estos componentes pueden afectar la eficiencia energética del biogás, es posible eliminarlos mediante tecnologías de purificación, las cuales optimizan el rendimiento del metano (ENRES, 2019).

### **2.13.2. Rendimiento de Metano**

El rendimiento del metano dependerá de la pureza del biogás generado. Como se mencionó previamente, la composición típica de este gas varía entre un 40 % y un 75 % de metano, siendo este el componente principal para diversas aplicaciones energéticas. Sin embargo, la aplicación y el tratamiento requeridos dependen de la pureza del biogás.

Es importante destacar que, aunque el rendimiento de metano es relevante, la mejora de la calidad del biogás es crucial. Las impurezas, como la humedad, los gases inertes y los gases ácidos, son responsables de problemas en los equipos de conversión de energía, siendo el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) uno de los contaminantes más peligrosos (ENRES, 2019).

Para concentraciones de metano entre el 60 % y el 80 %, tras la eliminación de humedad y sulfuro de hidrógeno, el biogás puede ser utilizado en aplicaciones de cogeneración, combustión y uso mecánico. Por otro lado, si la concentración de metano alcanza entre el 95 % y el 98 %, tras la eliminación del dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el gas se convierte en biometano, que puede reemplazar al gas natural en aplicaciones vehiculares, industriales o domésticas (ENRES, 2019).

### **2.13.3. Biofertilizantes**

Uno de los productos generados por la Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA) son los digestatos, o lodos, los cuales son ricos en nutrientes que pueden ser utilizados en diversos sectores, como en el crecimiento de plantas y la mejora de suelos. Para poder ser utilizados en estas aplicaciones, los digestatos deben pasar por un tratamiento adecuado para la eliminación de patógenos, lo que les permite ser aprovechados como biofertilizantes. Debido a su naturaleza y a que no requieren un proceso industrial tras su creación, los digestatos contribuyen a la reducción de los impactos ambientales, convirtiéndose en un producto sostenible (FAO, 2011).

### **2.13.4. Agua Tratada**

Si bien la Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA) nos proporciona principalmente un producto de valor agregado como el biogás, una de sus ventajas es que requiere un alto

porcentaje de humedad, lo que implica el uso de agua para diluir el sustrato en el reactor anaeróbico. A partir de este requisito, se ha aprovechado el uso de aguas residuales ricas en nutrientes, que pueden ser utilizadas en sinergia con el sustrato. De esta manera, las bacterias pueden degradar la materia orgánica contenida en el agua residual, reduciendo la concentración de contaminantes (Nabaterega et al., 2021). Este proceso no solo permite la generación de biogás, sino que también facilita el tratamiento del agua, obteniendo un cuerpo de agua que puede ser reutilizado, contribuyendo así a la preservación de este recurso tan fundamental (Mass & Medrano, 2013).

## **2.14. La Co-DA como un Impulso hacia la Economía Circular**

Se ha abordado previamente el concepto de la economía lineal, un modelo caracterizado por la producción en masa y un enfoque predominante en los beneficios económicos, relegando a un plano secundario las consideraciones medioambientales y sociales. En este contexto, se han evaluado alternativas que prioricen la sostenibilidad como un objetivo central. Entre estas, destaca la economía circular, un modelo que emula los ciclos naturales con el propósito de alcanzar una estabilidad integral en términos económicos, ambientales y sociales.

La economía circular busca maximizar la vida útil de los recursos empleados en los procesos productivos mediante su reutilización y/o integración en nuevos ciclos productivos. Este enfoque promueve sinergias de residuos entre diferentes industrias, generando beneficios conjuntos. Un ejemplo notable de esta práctica es la SI, definida como el intercambio físico de materiales, energía, agua y subproductos entre entidades diversas. Este modelo ha sido implementado ampliamente en Europa, evidenciando mejoras en la eficiencia de los procesos, reducción de desechos, y un uso más sostenible de los recursos. En años recientes, tanto la economía circular como la SI se han consolidado como estrategias prometedoras para abordar problemáticas ambientales y optimizar el aprovechamiento de los recursos (Chertow, 2000).

Aunque la SI presenta ventajas significativas en términos económicos, energéticos y ambientales, su implementación no es universalmente aplicable. La compatibilidad de las industrias para establecer sinergias efectivas depende de la naturaleza de sus subproductos y procesos. Por lo tanto, resulta indispensable llevar a cabo investigaciones, análisis y experimentaciones rigurosas que permitan evaluar la viabilidad técnica y económica de las propuestas de sinergia industrial (Ramin et al., 2024).

En este sentido, la Co-DA emerge como una herramienta con potencial para promover un modelo de economía circular a través de los productos derivados de sus procesos.

En aplicaciones industriales como la nixtamalización y la producción de cerveza, los productos con valor agregado obtenidos mediante la Co-DA podrían ser integrados en los distintos procesos involucrados, fortaleciendo la sostenibilidad y la eficiencia de estas actividades.

## **2.15. Principales indicadores de una evaluación económica**

Los proyectos de plantas de biogás, al igual que cualquier iniciativa a largo plazo que requiera un análisis de viabilidad económica, deben considerar de manera integral los costos asociados. Estos incluyen la inversión inicial, la adquisición de equipos y los costos operativos asociados a su funcionamiento durante el ciclo de vida del proyecto. Asimismo, deben contemplarse otros gastos, como los relacionados con la construcción y el mantenimiento de la planta (Pinto et al., 2023). En términos generales, el análisis de viabilidad económica puede desglosarse en tres categorías principales: costos de inversión inicial, costos operativos e ingresos generados por el proyecto.

La evaluación de este análisis se fundamenta comúnmente en un flujo de caja, utilizando indicadores clave como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación. Estos parámetros permiten cuantificar la rentabilidad y factibilidad económica del proyecto, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones (Gitman, 2007; Purwanta et al., 2022; Rahmani et al., 2025).

### **2.15.1. Costos de Capital**

Todo proyecto requiere una inversión inicial, en la cual intervienen diversos agentes. Los principales son los propietarios del proyecto; sin embargo, cuando se necesita una mayor cantidad de capital, es común recurrir a inversionistas externos y/o instituciones financieras para la obtención de préstamos. Para que estos agentes acepten participar, deben cumplirse ciertos requisitos clave, como el costo de capital y el tiempo de recuperación de la inversión.

El costo de capital se refiere al porcentaje mínimo necesario para satisfacer las expectativas de retorno de todos los involucrados en la inversión inicial. Aunque este valor representa únicamente un umbral financiero, su medición y aplicación efectiva dependen de otros factores que determinan la viabilidad económica del proyecto. Entre estos, destacan el tiempo de recuperación de la inversión y el porcentaje de retorno destinado a los propietarios. En particular, un porcentaje de retorno más bajo para los

propietarios suele implicar un periodo de recuperación más prolongado, lo que podría afectar la aceptación del proyecto (Kim et al., 2022).

### **2.15.2. Costos Operativos**

Estos costos están directamente relacionados con las actividades productivas del giro empresarial. Entre ellos se incluyen los gastos asociados a la adquisición de materia prima, servicios básicos como agua, electricidad y combustible. Además, se consideran los costos relacionados con el personal involucrado, tales como la mano de obra requerida para operar el sistema y realizar su mantenimiento.

La relevancia de estos costos radica en su impacto sobre el costo de producción y el precio asignado a los productos. Esto permite calcular los ingresos potenciales derivados de la venta de los productos a lo largo del tiempo y evaluar la rentabilidad del proyecto.

Diversos factores pueden influir negativamente en el desempeño y viabilidad de las plantas de digestión anaeróbica. Entre ellos destacan la falta de servicios adecuados posteriores a la instalación, un mantenimiento insuficiente, la carencia de conocimientos técnicos adecuados por parte de los usuarios, y la baja eficiencia operativa de las plantas. Esta última puede ser causada por la inhibición de parámetros clave, como el pH, la temperatura y la relación C:N. Además, factores externos como la preferencia por otros combustibles, como el gas licuado de petróleo (GLP) y la electricidad, pueden limitar su utilización y sostenibilidad (Cheng et al., 2024).

### **2.15.3. Ingresos**

Los ingresos generados por la venta de los productos producidos en la empresa representan un retorno económico dividido en dos componentes principales: la recuperación de la inversión inicial y las ganancias derivadas del valor agregado asignado a los productos. Este flujo de ingresos forma parte fundamental de los recursos financieros del proyecto como resultado de la actividad productiva. Adicionalmente, pueden identificarse otros ingresos provenientes de fuentes externas, como inversiones iniciales de capital o préstamos.

Como se ha mencionado previamente, el proceso de DA ha sido objeto de investigación y análisis, particularmente en la separación de fases, con el objetivo de optimizar su rendimiento. Diversos estudios han demostrado que esta técnica es eficiente, ya que mejora significativamente el desempeño de los digestores y permite un aumento notable

en el potencial de generación de biogás. Aunque la implementación de este enfoque implica un incremento en los costos de inversión inicial, los beneficios derivados de la mayor generación de energía pueden traducirse, a largo plazo, en ingresos superiores. Esto contribuye a reducir el período de retorno de la inversión, fortaleciendo la viabilidad económica del proyecto (Fuess et al., 2018).

Para este estudio, los cálculos económicos se realizaron considerando solo el proceso de producción y la propuesta. En ese caso, se consideran los siguientes puntos:

- Una inversión inicial estimada
- Un costo de operación y mantenimiento estimado
- Reducción de costo a partir del ahorro de compra de en GLP

De esta forma, la ecuación 3.1 a considerar para los costos anuales sería la siguiente:

$$CA = IA - CO\&M \quad (2.1)$$

Donde:

- $CA$  es el costo anual,
- $IA$  es el ingreso anual,
- $CO\&M$  es el costo de operación y mantenimiento.

La inversión inicial es considerada en el estudio de flujo de caja en el primer año de estudio, como también para el análisis del Valor Actual Neto (VAN).

#### 2.15.4. Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es un parámetro que representa la diferencia entre el valor presente de los flujos de entrada y salida de efectivo generados durante un período, considerando el efecto de la inflación. Este indicador se emplea para evaluar la rentabilidad y viabilidad económica de un proyecto (Campello et al., 2021). Un VAN positivo indicará que el proyecto es rentable, debido a que existe retorno para los inversionistas, en cambio, un VAN negativo, significa que el proyecto no es rentable y se recomienda no invertir (Tisocco et al., 2025). A su vez, entre mayor sea el VAN de un proyecto, se obtienen mayores beneficios económicos (Zhao et al., 2024). Se puede calcular a partir de la siguiente ecuación 3.2:

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (2.2)$$

Donde:

- $FC_t$ : Flujo de caja en el periodo  $t$
- $i$ : Costo de capital
- $n$ : Vida útil del proyecto
- $I_0$ : Inversión inicial

### 2.15.5. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es un indicador que mide la rentabilidad de un proyecto a lo largo del tiempo. Específicamente, representa el porcentaje que se recuperará anualmente en función de la inversión inicial y los ingresos generados durante un período determinado. Para que un proyecto sea considerado rentable tras su análisis, la TIR debe ser superior a 0 (Huiru et al., 2019). Se analiza a partir de la ecuación 3.3.

$$ROI(\%) = \frac{\text{Beneficio Neto Actual}}{\text{Inversión Total de Capital}} \quad (2.3)$$

### 2.15.6. Período de Retorno

El período de recuperación representa el momento en el que los ingresos generados por un proyecto igualan la inversión total realizada en el mismo (Roy et al., 2024). Esta métrica es fundamental para evaluar la factibilidad del proyecto, ya que permite comparar el período de retorno con el ciclo de vida de la planta. A pesar de que este método presenta limitaciones significativas, como la omisión del valor temporal del dinero y la falta de consideración de los rendimientos posteriores al período de recuperación, sigue siendo una herramienta esencial en la toma de decisiones de inversión debido a su simplicidad y a la claridad de sus cálculos (Sun et al., 2024). Su cálculo es a partir de la ecuación 3.4.

$$y = \frac{\text{Inversión Total de Capital}}{\text{Beneficio Neto Actual}} \quad (2.4)$$

En Europa, la DA utilizada para la generación de biogás es una de las principales tecnologías aplicadas en empresas de pequeña y mediana escala, como aquellas dedicadas a la agricultura, la industria alimentaria y la gestión de residuos. Sin embargo, todavía es necesario desarrollar herramientas que permitan maximizar su potencial y consolidar este modelo de generación energética, alineado con los principios de la economía circular. Entre estas herramientas destacan la recopilación de datos técnicos y científicos, la sistematización de experiencias, así como el diseño de políticas públicas e incentivos adecuados.

Un caso particular abordado en este artículo es la necesidad de disponer de datos

reales sobre la producción de energía eléctrica a partir del biometano generado en el proceso de DA. Por esta razón, se realiza un análisis económico de tres plantas de DA a escala real, considerando parámetros como la biomasa suministrada, la inversión inicial y las operaciones de mantenimiento. El objetivo es analizar cómo estos factores influyen en los costos finales de producción de gas y electricidad.

Las tres plantas evaluadas presentan diferencias en sus dimensiones y los sustratos utilizados. Se registró la producción anual de energía eléctrica en kWh, tomando como referencia el poder calorífico del metano (0.2474 kWh/mol CH<sub>4</sub>), y se documentaron tanto los costos de inversión como los costos operativos. Los resultados del estudio revelaron un beneficio anual positivo en las tres plantas, incluso en un caso donde el tratamiento de residuos fue limitado (Riva et al., 2014).

### **2.15.7. Análisis de Sensibilidad**

Numerosos estudios han empleado el método de flujo de caja para realizar análisis de viabilidad económica. Sin embargo, también se ha utilizado otro enfoque conocido como análisis de sensibilidad, que permite evaluar la variabilidad de los beneficios finales al modificar los valores de entrada de los parámetros más susceptibles a cambios a lo largo del tiempo. Entre estos parámetros se incluyen el costo de los servicios, la materia prima, el reemplazo de equipos, entre otros.

Este análisis resulta fundamental para definir los límites de los sistemas sometidos a estudio, ya que permite reducir la incertidumbre asociada a la viabilidad del proyecto. En otras palabras, contribuye a minimizar el porcentaje de riesgo involucrado en su implementación (Lin et al., 2018).

Se han establecido diversos escenarios de DA, se han evaluado distintas variables que pueden cambiar con el tiempo. Variables como el precio de la venta de productos obtenidos como el biogás o digestato. Los costos iniciales pueden variar debido a la aplicación o no de un pretratamiento del sustrato, donde influyen parámetros como el costo del equipo, costo de operación debido al uso energético, y los lapsos de tiempo de uso. Otros pueden ser el mantenimiento de los equipos, donde esto depende del ciclo de vida de estos o alguna falla no deseada (Huiru et al., 2019; Kim et al., 2022; Ziero et al., 2023).

Los factores económicos en los proyectos de DA dependen de diversos aspectos, entre ellos, los pretratamientos, el volumen del biodigestor y la finalidad del proyecto.

Este último aspecto es crucial, ya que los productos obtenidos, como el biogás, pueden destinarse a la generación de energía eléctrica para el propio sistema o para su comercialización. Asimismo, el biogás puede ser purificado para mejorar su contenido de metano y venderse con un mayor valor agregado. Otro factor relevante es la comercialización de biofertilizantes, lo que puede influir significativamente en la rentabilidad del proyecto.

Estos elementos afectan directamente la viabilidad económica del sistema y la variabilidad de indicadores financieros clave, como la inversión inicial, el VAN, la TIR y el período de recuperación de la inversión. Adicionalmente, deben considerarse otros factores técnicos, como el tipo de biodigestor empleado, el régimen de tratamiento (mesofílico o termofílico) y la posible implementación de sistemas con múltiples biodigestores para la separación de fases.

Diversos estudios han reportado valores de VAN que oscilan entre 131 mil y 11 millones de dólares, dependiendo de las ganancias generadas y del capital invertido, que puede situarse entre 1 y 67 millones de dólares (Park et al., 2025; Sillero et al., 2023; Ziero et al., 2023). Las tasas internas de retorno han variado en un rango de 4.5 % a 30 %, mientras que los períodos de recuperación han fluctuado entre 1 y 8 años (Boshagh et al., 2025; El Ibrahimy et al., 2021; Tisocco et al., 2025). Además, los proyectos analizados suelen considerar ciclos de vida de 20, 30 y hasta 50 años, lo que influye en la evaluación de su rentabilidad a largo plazo. Finalmente, los costos de operación y mantenimiento se han estimado en aproximadamente un 20 % de la inversión inicial (Cheng et al., 2024; Luo et al., 2023).

## **2.16. Evaluación Ambiental**

### **2.16.1. Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Los GEI son aquellos que, mediante la interacción con la radiación infrarroja, participan en la transmisión de calor desde el Sol hacia la Tierra. Se debe mencionar que el Efecto Invernadero es un fenómeno natural en la Tierra. Es importante señalar que el efecto invernadero es un fenómeno natural fundamental para el equilibrio terrestre, ya que estos gases tienen ciclos propios que permiten transmitir el calor necesario para sustentar la vida y mantener el equilibrio de los ecosistemas. No obstante, las actividades humanas han alterado estos ciclos, provocando una acumulación excesiva de GEI en la atmósfera. Entre las actividades responsables de este desequilibrio se encuentran la quema de combustibles fósiles, las emisiones de vapores de centrales termoeléctricas, los

procesos de refinación y transporte, la explotación ganadera, especialmente de bovinos, así como la disposición final de residuos, tratamiento de aguas residuales (IPCC, 2007).

### 2.16.2. CO<sub>2</sub> equivalente

La huella de carbono se mide en términos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), un indicador que refleja el impacto ambiental de una organización en función de las emisiones de GEI asociados. Este indicador permite homogeneizar las diversas emisiones de GEI mediante su conversión a un valor equivalente de CO<sub>2</sub>, facilitando la evaluación del impacto ambiental de actividades, industrias o productos, considerando incluso las emisiones generadas durante su producción. La utilización de este enfoque es relevante, ya que permite una comparación más efectiva basada en un solo gas de referencia. Por ejemplo, el metano posee un mayor potencial de concentración y calentamiento en la atmósfera que el CO<sub>2</sub>, lo que refuerza la importancia de esta equivalencia (EPA, 2024).

Es crucial considerar este parámetro al realizar un análisis de viabilidad de proyectos, incluso en investigaciones teóricas. Este análisis proporciona información clave sobre la reducción o el aumento de emisiones al comparar un caso base real con los casos de estudio de la tecnología propuesta.

En el caso específico de la nixtamalización, resulta fundamental contar con datos sobre materia prima, combustibles y, especialmente, la generación de nejayote. Estos parámetros no solo permiten evaluar el estado actual del proceso de producción desde perspectivas técnicas, económicas y ambientales, sino que también son esenciales para llevar a cabo el análisis de producción de energía teórica. En particular, el estudio del nejayote proporciona datos que facilitan la comparación entre escenarios, ayudando a determinar la viabilidad del proyecto.

De las ecuaciones fundamentales para el análisis de generación de GEI a partir de nejayote, es la ecuación 2.5, la cual proporciona las emisiones de metano al ambiente a partir de aguas residuales.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum_i [(TOW_i - S_i) EF_i - R_i] \times 10^{-3} \quad (2.5)$$

- $TOW_i$ : Material total orgánico mente degradable en las aguas residuales de la industria  $i$  en el año de inventario, en  $\frac{\text{kg DQO}}{\text{año}}$ .
- $S_i$ : Componente orgánico eliminado en forma de lodo en el año de inventario, en  $\frac{\text{kg DQO}}{\text{año}}$ .

- $EF_i$ : Factor de emisión de metano, en  $\frac{\text{kg CH}_4}{\text{kg DQO}}$ .
- $R_i$ : Cantidad de  $\text{CH}_4$  recuperado en el año de inventario, en  $\frac{\text{kg CH}_4}{\text{año}}$ .

## **Capítulo 3**

# **Estudios y resultados del caso base en comparación con la propuesta tecnológica**

En este capítulo se presentan los apartados relacionados con el trabajo realizado en el proyecto de estudio. Se expuso la metodología principal, la cual integró diferentes métodos y técnicas desarrollados a partir de los estudios realizados. En particular, se analizó el caso base, en el que se aplicaron diversos cálculos económicos y ambientales al proceso convencional de nixtamalización.

Asimismo, se detalló el trabajo realizado en las pruebas de caracterización fisicoquímica a las que fueron sometidos los residuos generados, específicamente el nejayote y el bagazo de cerveza. A partir de los resultados obtenidos en la caracterización y del análisis de las dinámicas de producción de estos residuos, se calculó el potencial teórico de generación de metano. Estos resultados permitieron comparar el proceso convencional con una alternativa que considera la reducción de costos y contaminantes mediante la generación de metano y el tratamiento teórico de las aguas residuales.

### **3.1. Propuesta de simbiosis industrial a partir de la biometanización del nejayote y bagazo de cerveza**

En la Figura 3.1 se presenta la propuesta de simbiosis industrial entre el proceso de nixtamalización y la producción de cerveza. Se describió el proceso de nixtamalización específico del caso de estudio, en el cual se dispondría su residuo, el nejayote, y, de manera paralela, en la empresa de cerveza artesanal, el residuo de bagazo de cerveza. Ambos residuos serían ingresados a un sistema de Co-DA, en el que interacturarían de

forma sinérgica para generar diversos productos: agua tratada, biogás, biofertilizantes y CO<sub>2</sub>, este último obtenido a partir del proceso de purificación del biogás. Cabe destacar que el CO<sub>2</sub> recuperado podría ser aprovechado dentro del mismo proceso industrial cervecero, específicamente en la etapa de carbonatación de la cerveza, cerrando así un ciclo de aprovechamiento sostenible de recursos.

El agua tratada obtenida del proceso de Co-DA se contempló como bioabono líquido, dada su alta concentración de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que permitiría su aplicación directa en suelos agrícolas o áreas verdes con fines de mejora y recuperación.

Por otro lado, el biogás generado podría ser aprovechado como fuente de energía térmica y/o eléctrica, tanto para el proceso de nixtamalización como para operaciones auxiliares del sistema Co-DA, tales como la calefacción del biodigestor, el funcionamiento de bombas y del sistema de agitación. El autoabastecimiento energético, junto con la posible comercialización del biogás excedente, representa un conjunto de factores que podrían contribuir significativamente a la reducción de los costos operativos del sistema.

Adicionalmente, el bioabono sólido obtenido durante el proceso podría destinarse a la remediación de suelos en espacios verdes, promoviendo un modelo de economía circular.

Al lograr una sinergia efectiva entre los residuos utilizados, se favorecería un tratamiento eficiente del nejayote, particularmente en términos de remoción de contaminantes, lo que a su vez podría disminuir la necesidad de procesos de postratamiento complejos, como la ósmosis inversa o la filtración avanzada.

Lo anteriormente expuesto sugiere una oportunidad para generar ahorros económicos derivados del uso del biogás como fuente de energía y del aprovechamiento de los subproductos como biofertilizantes. No obstante, también se identifican beneficios adicionales de carácter social y ambiental, derivados de la implementación de esta simbiosis industrial sostenible.

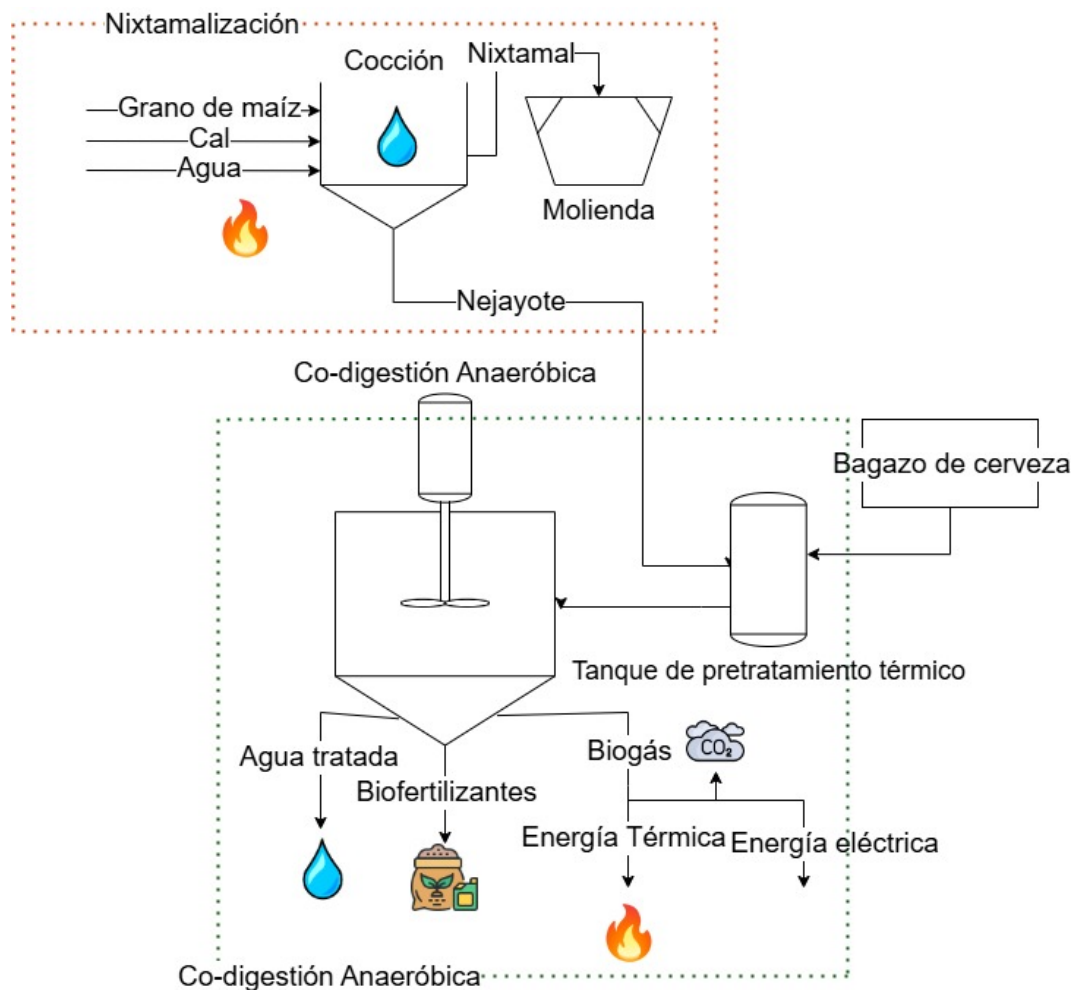


Figura 3.1: Propuesta de simbiosis industrial de nixtamalización y la producción de cerveza. Fuente propia.

### 3.1.1. Beneficios socioeconómicos

La implementación de un sistema de co-digestión anaerobia (Co-DA) en el aprovechamiento de residuos provenientes de la industria nixtamalera y micro-cervecera no solo representa una estrategia ambientalmente sostenible, sino que también puede generar impactos positivos a nivel económico y social. En primer lugar, al reducir los costos operativos asociados a la disposición de residuos y al consumo energético, ambas industrias tendrían la posibilidad de ofrecer productos derivados a precios más accesibles para los consumidores. Esta disminución en los costos de producción puede traducirse en una mejora en la competitividad del sector y en un mayor acceso a alimentos básicos derivados del maíz y productos artesanales como la cerveza.

Por otro lado, el tratamiento adecuado del nejayote contribuye directamente a la preservación de la calidad y disponibilidad del recurso hídrico, un aspecto de creciente

relevancia ante el panorama actual de escasez de agua. Al evitar la descarga directa de este residuo altamente contaminante en cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado, se protege la integridad de los ecosistemas acuáticos y se garantiza una mayor disponibilidad de agua limpia para otros usos.

Adicionalmente, la gestión integral de residuos mediante digestión anaerobia ofrece beneficios significativos en términos de salud pública y mitigación del cambio climático. La estabilización de los residuos orgánicos y la producción de biogás como fuente alternativa de energía permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al sustituir el uso de combustibles fósiles como el gas LP. Asimismo, se disminuye la generación de olores y la proliferación de vectores asociados a la descomposición de residuos sólidos, lo cual mejora la calidad del aire y las condiciones sanitarias en el entorno (Ziero et al., 2023).

### **3.1.2. Beneficios ambientales**

El uso del biogás como fuente de energía térmica o eléctrica contribuye a una significativa reducción en la dependencia de combustibles fósiles, lo que, a su vez, disminuye la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Esta transición hacia fuentes de energía renovables favorece la sostenibilidad del proceso y ayuda a mitigar los impactos del cambio climático.

Por otro lado, el agua tratada obtenida del proceso de co-digestión anaerobia se contempla para su aprovechamiento como bioabono líquido, dada su alta concentración de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Este bioabono puede ser utilizado en la agricultura o la remediación de suelos, contribuyendo a la optimización del uso del recurso hídrico y garantizando su conservación para futuras generaciones, en un contexto donde el acceso al agua es cada vez más limitado.

La generación de biofertilizantes como subproducto del proceso de Co-DA también representa una opción viable para la remediación de suelos degradados, mejorando la calidad del suelo sin depender de fertilizantes químicos, lo que contribuye a la salud del ecosistema.

La simbiosis entre industrias, en este caso, la nixtamalera y la micro-cervecera, genera múltiples beneficios, como la reducción del gasto en materia prima y energía, así como una disminución significativa en la generación de residuos. Este modelo de economía circular permite un uso más eficiente de los recursos y minimiza los impactos

negativos sobre el medio ambiente.

La implementación de un parque industrial de nixtamalización y micro-cerveceras basado en este modelo de co-digestión anaerobia representa un proyecto factible y autónomo, que traería beneficios tanto a nivel interno (reducción de costos operativos y optimización de recursos) como externo (beneficios ambientales y sociales), promoviendo una industria más sostenible (Saldaña Oyarzábal, 2023).

## 3.2. Caso Base

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de nixtamalización es un método tradicional de cocción del grano de maíz utilizado para la producción de diversos alimentos, como las tortillas. Se trata de un proceso de gran relevancia en México, ya que los productos derivados de este método son ampliamente consumidos por la población.

En particular, la empresa de nixtamalización con la que se colaboró produce grano de maíz pozolero precocido, el cual es empacado y posteriormente comercializado como un producto listo para su cocción final y consumo.

Durante el estudio, se llevaron a cabo distintas etapas de acercamiento a la empresa para establecer un convenio de colaboración. Es importante destacar que el encargado de la empresa mostró interés desde el inicio en abordar una de las problemáticas ya mencionadas: el manejo del nejayote. Desde las primeras interacciones, describió la gestión actual de este residuo y presentó la situación como una oportunidad para su análisis.

Se iniciaron gestiones para coordinar una reunión destinada al reconocimiento del proceso y, principalmente, la realización del primer muestreo del nejayote. Una vez en el sitio, se llevó a cabo el análisis detallado del proceso, una conversación general sobre su funcionamiento, la identificación de los posibles alcances del proyecto y el muestreo inicial del residuo.

En muestreos posteriores, se realizó una entrevista sobre los insumos utilizados en el proceso, incluyendo el agua, el maíz, la cal y el combustible, así como las cantidades estimadas de uso por cocción. La dinámica del proceso se presenta en la Figura 3.2.

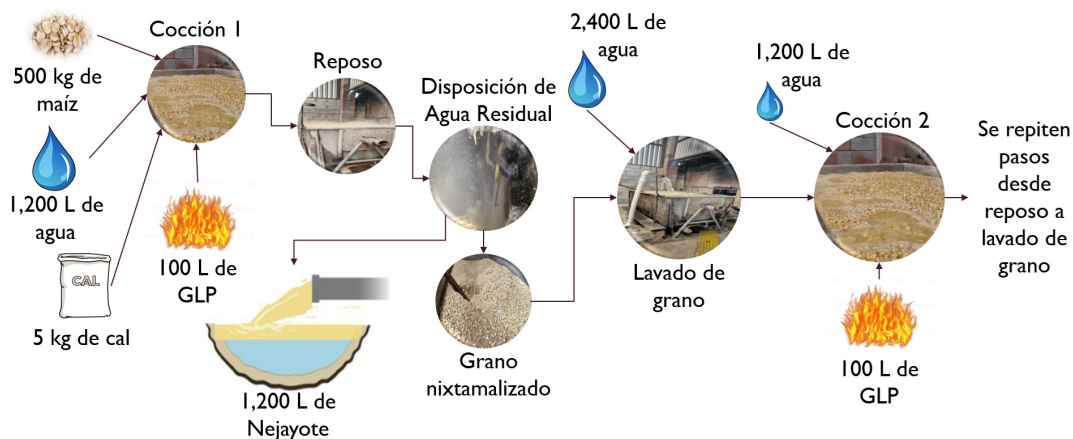


Figura 3.2: Diagrama de la dinámica del proceso actual de la empresa de nixtamalización. Fuente propia.

Como se observa en la Figura 3.2, el proceso presenta ciertos elementos similares al método tradicional; sin embargo, se implementaron algunas variaciones. Este procedimiento estuvo enfocado en la cocción de media tonelada de maíz, utilizando una mezcla de 1,200 L de agua y 5 kg de cal. Para la primera cocción, se emplearon 100 L de Gas Licuado de Petróleo (GLP) como combustible.

Posteriormente, el grano cocido y la mezcla fueron sometidos a un periodo de reposo de 45 minutos a 1 hora. Una vez finalizado este proceso, la mezcla fue retirada, generando el nejayote, el cual se descargó en el alcantarillado. El grano cocido pasó por un lavado con la incorporación de 2,400 L de agua y un proceso de mezclado para garantizar una limpieza uniforme.

Tras el lavado, se llevó a cabo una segunda cocción, en la cual se emplearon las mismas cantidades de agua y GLP que en la primera, con la excepción de la cal, que no fue añadida en esta etapa. Posteriormente, se repitieron las fases de reposo y lavado del grano, finalizando con el proceso de empaquetado.

A partir de estos datos, se llevaron a cabo diversas etapas metodológicas para evaluar el impacto económico y ambiental del proceso de nixtamalización de la empresa. Para ello, se consideraron distintas variables, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2.

Tabla 3.1: Consideraciones para la obtención de costos del proceso de nixtamalización convencional

| <b>Consideración</b> | <b>Fórmula o Dato</b>  | <b>Fuente</b>                           |
|----------------------|--|---|
| Costo de Agua        | Tarifas de costos de CESPМ en Mexicali Baja California.  | (CESPM)                                 |
| Costo de GLP         | Promedio a partir de costos de GLP en Mexicali Baja California.  | (CRE, 2021)                             |
| Costo de Cal         | Cálculo de costo para las proporciones utilizadas a partir del costo de costal utilizado por la empresa. | (Materiales y Recubrimientos, 2020)     |
| Costo de Maíz        | Costo aproximado obtenido del mercado.   | Mencionado por encargado de la empresa. |

La Tabla 3.1 presenta las consideraciones clave para el estudio económico del proceso convencional de nixtamalización. Los datos que se muestran incluyen las tarifas y costos de insumos fundamentales, tales como el agua, GLP (Gas Licuado de Petróleo), cal y maíz, que son esenciales para la realización del proceso. Estos valores fueron obtenidos a partir de diversas fuentes locales, como las tarifas de la CESPМ en Mexicali (para el costo de agua), el promedio de costos de GLP en la misma región (CRE, 2021), y cálculos específicos realizados para los insumos de cal y maíz, basados en costos de mercado y proveedores directos.

Los costos presentados en esta tabla sirven como base, junto con las cantidades de recursos utilizados durante el proceso de nixtamalización, para calcular las equivalencias correspondientes a los costos mensuales y anuales del proceso. Estos cálculos serán fundamentales para la evaluación económica del proceso convencional.

Tabla 3.2: Consideraciones para la obtención del impacto ambiental del proceso de nixtamalización convencional.

| Consideración                            | Fórmula o Dato  | Fuente                            |
|--|---|-----------------------------------|
| Factores de emisión de GLP               | $CO_2 = 63,100 \text{ kg/TJ}$<br>$CH_4 = 5 \text{ kg/TJ}$<br>$N_2O = 0,1 \text{ kg/TJ}$                                       | (IPCC, 2006)                      |
| Factor de emisión de Metano              | $28 CO_2e$  | (SEMARNAT, 2016)                  |
| Fórmulas de emisión                      | $ECO_2 = VC \times PC \times FE_{CO_2}$<br>$ECH_4 = VC \times PC \times FE_{CH_4}$<br>$EN_2O = VC \times PC \times FE_{N_2O}$ | (SEMARNAT, 2016)                  |
| Generación de $CH_4$ de aguas residuales | $Emisiones \ de \ CH_4 =$<br>$\sum_i [(TOW_i - S_i) \cdot EF_i - R_i] \cdot 10^{-3}$  | (World Resources Institute, 2014) |
| Valor Calorífico de GLP                  | $46,16 \text{ MJ/kg}$<br>$26 \text{ KWh/m}^3$   | (INECC, 2014)                     |
| Valor Calorífico de Metano               | $10 \text{ KWh/m}^3$  | (FAO, 2011)                       |

La Tabla 3.2 presenta las consideraciones clave para el estudio ambiental del proceso convencional de nixtamalización, y sirve como base para la posterior comparación con la propuesta tecnológica. En esta tabla se incluyen datos relevantes como los factores de emisión y los poderes caloríficos de los gases involucrados, tales como el GLP (Gas Licuado de Petróleo) y el metano, que son esenciales para evaluar el impacto ambiental del proceso. También se muestra la fórmula utilizada para calcular la generación de gases a partir de las aguas residuales.

Estos datos permiten realizar las conversiones y equivalencias necesarias para obtener los resultados del impacto ambiental tanto del proceso convencional como de la propuesta tecnológica. Los resultados se traducen en toneladas de  $CO_2$  equivalente, lo cual es crucial para la evaluación comparativa de ambos procesos desde una perspectiva ambiental.

A continuación, se presentan las Tablas 3.3 y 3.4, que detallan los resultados obtenidos en cuanto a los recursos utilizados en el proceso de nixtamalización, con un enfoque tanto económico como ambiental. La Tabla 3.3 muestra los resultados mensuales, mientras que la Tabla 3.4 presenta los resultados anuales. En ambas tablas, se incluyen los costos asociados a cada recurso, así como el impacto ambiental en términos de toneladas de  $CO_2$  equivalente.

De estas tablas se destacan los resultados totales de cada aspecto, lo que permite observar los impactos acumulados tanto en términos económicos como ambientales,

facilitando una comparación entre las diferentes variables a lo largo del tiempo.

Tabla 3.3: Impacto económico y ambiental mensual del proceso de nixtamalización convencional

| Recurso      | Cantidad           | Costo (\$MXN)                  | Impacto Ambiental (ton CO <sub>2</sub> eq) |
|--------------|--------------------|--------------------------------|--|
| Agua         | 57,600 – 115,200 L | 5,994.56 – 12,666.54           | 1.73 – 3.47                                |
| Maíz         | 4,000 – 8,000 kg   | 220,000 – 440,000              | –  |
| Cal          | 40 – 80 kg         | 280 – 560                      | –  |
| GLP          | 1,600 – 3,200 L    | 15,600 – 31,200                | 2.45 – 4.91                                |
| <b>Total</b> | –                  | <b>241,874.56 – 484,426.54</b> | <b>4.19 – 8.37</b>                         |

Tabla 3.4: Impacto económico y ambiental anual del proceso de nixtamalización convencional

| Recurso      | Cantidad              | Costo (\$MXN)                      | Impacto Ambiental (ton CO <sub>2</sub> eq) |
|--------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| Agua         | 691,200 – 1,382,400 L | 71,934.77 – 151,998.53             | 20.79 – 41.59                              |
| Maíz         | 48,000 – 96,000 kg    | 2,640,000 – 5,280,000              | –  |
| Cal          | 480 – 960 kg          | 3,360 – 6,720                      | –  |
| GLP          | 19,200 – 38,400 L     | 187,200 – 374,400                  | 29.44 – 58.87                              |
| <b>Total</b> | –                     | <b>2,902,494.77 – 5,813,118.53</b> | <b>50.23 – 100.46</b>                      |

Las Tablas 3.3 y 3.4 muestran un impacto tanto económico como ambiental significativo en el proceso de nixtamalización. Si bien el maíz representa el mayor porcentaje del costo en el proceso, no se observa un impacto ambiental directo relacionado con su uso. No obstante, este impacto se refleja indirectamente en los resultados ambientales de las aguas residuales, debido a que ciertos componentes del grano se desprenden durante el proceso de nixtamalización y terminan en el nejayote.

En términos generales, los principales impactos ambientales provienen del uso de agua y GLP (Gas Licuado de Petróleo). El impacto ambiental de agua varía entre 1.73 y 3.47 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y el del GLP se encuentra entre 2.45 y 4.91 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, aumentando conforme se incrementa la producción.

En cuanto al impacto económico, el agua representa aproximadamente 2.6 % del costo total, mientras que el GLP tiene un impacto económico del 6.5 % del costo total. Ambos valores crecen proporcionalmente con el aumento de la producción.

Este análisis destaca la necesidad de optimizar el uso de recursos, como el GLP,

cuyo impacto económico y ambiental podría reducirse mediante su sustitución por biogás generado a partir de la tecnología propuesta. Esta alternativa no solo disminuiría el impacto ambiental, sino también los costos operativos, promoviendo una mayor sostenibilidad y eficiencia económica en el proceso.

### **3.3. Caracterización Físicoquímica**

La caracterización físicoquímica de ambos residuos resultó fundamental para determinar sus propiedades específicas y comprender su comportamiento en el contexto del estudio. Si bien en la literatura existen estudios previos que reportan caracterizaciones físicoquímicas similares, el análisis específico de los residuos estudiados permitió obtener resultados más precisos para la estimación del potencial teórico de metano.

Por otro lado, la codigestión anaeróbica de estos residuos no había sido previamente estudiada, lo que representa una contribución novedosa a la literatura científica particularmente en lo referente a las pruebas físicoquímicas aplicadas a este tipo de procesos.

A partir de estas pruebas, se determinó el potencial energético de ambos residuos y se evaluó la viabilidad de su aprovechamiento a través de un proceso de codigestión anaeróbica. En la etapa inicial del proyecto de investigación se realizaron los muestreos correspondientes de ambos residuos en sus respectivas instalaciones. La metodología empleada para este estudio se muestra en la Figura 3.3 y 3.11.

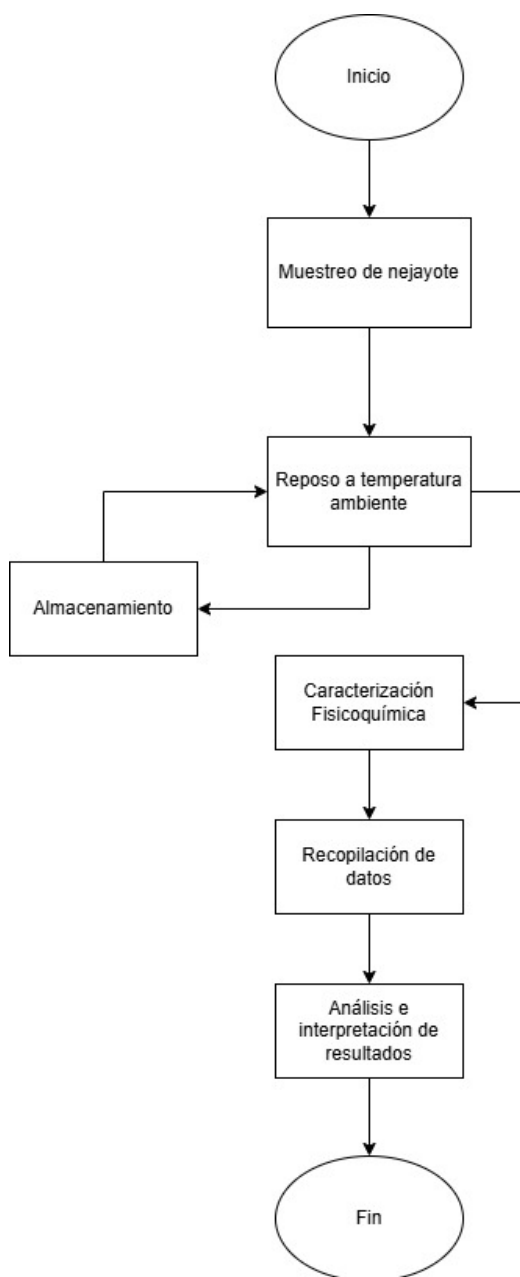


Figura 3.3: Metodología de muestreo y análisis de nejayote. Fuente propia

Los muestreos de nejayote se llevaron a cabo directamente en el sitio de producción, en el momento en que se realizaba la disposición del residuo. Dado que el residuo presentaba temperaturas cercanas a los 90 °C, el procedimiento de muestreo se realizó empleando materiales y equipos especializados con la finalidad de garantizar condiciones óptimas de seguridad durante la manipulación del residuo.

En los muestreos iniciales, la ubicación de la descarga del nejayote facilitó la extracción del residuo, tal como se muestra en la Figura 3.4. Sin embargo, en muestreos posteriores,

la extracción de las muestras se realizó desde la parte inferior del tanque (Figura 3.5), lo que requirió ingresar a través de un compartimiento lateral (Figura 3.6).

En esta zona, se acumulaba calor debido a la alta temperatura del residuo y al vapor concentrado, lo que dificultó aún más la manipulación de los frascos destinados a la recuperación de muestras. Por tal motivo, se emplearon materiales adicionales para garantizar la seguridad de este procedimiento. Los materiales utilizados fueron:

- Lentes de protección
- Guantes resistentes al calor
- Tapones para los oídos



Figura 3.4: Muestreo inicial de nejayote



Figura 3.5: Salida de nejayote inferior del tanque

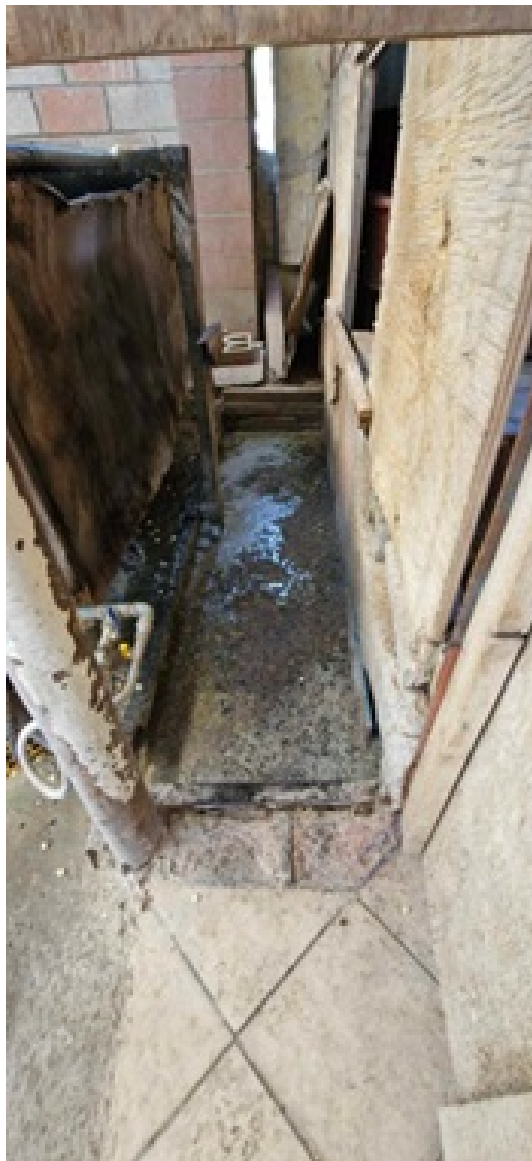


Figura 3.6: Compartimiento lateral del tanque



Figura 3.7: Frascos de vidrio para la recolección de muestras

La Figura 3.7 presenta los frascos utilizados para la recolección de muestras de nejayote, cada uno con una capacidad de un litro. Durante el proceso de muestreo, los frascos fueron previamente templados con el mismo residuo, con el objetivo de evitar choques térmicos que pudieran alterar las características de la muestra. Posteriormente, se procedió a ingresar el volumen total del nejayote recolectado en cada frasco.

Dependiendo de las condiciones del muestreo, las muestras fueron almacenadas temporalmente en una cubeta o transportadas en una mochila. Estos recipientes permitieron el traslado seguro del material hasta el área de análisis.



Figura 3.8: Guantes resistentes al calor



Figura 3.9: Lentes de protección y tapones para oídos

Las Figuras 3.8 y 3.9 muestran el equipo de protección personal utilizado durante el proceso de muestreo. Se emplearon guantes con el fin de soportar el calor emitido por el residuo durante su manipulación. Adicionalmente, considerando la posición adoptada para la toma de muestras y el riesgo de salpicaduras, se utilizaron lentes de protección y tapones para oídos, con el propósito de prevenir posibles derrames en la zona facial y proteger al operador.

Dependiendo de las condiciones del muestreo, las muestras fueron almacenadas temporalmente en una cubeta o transportadas en una mochila (3.10). Estos recipientes permitieron el traslado seguro del material hasta el área de análisis. Al llegar al laboratorio, y debido a la alta temperatura del contenido, los frascos fueron colocados en reposo dentro de una campana de extracción, permitiendo que alcanzaran la temperatura ambiente.

Una vez que los frascos alcanzaron la temperatura ambiente, se almacenaron en un refrigerador a una temperatura de  $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2016), hasta el momento de realizar las pruebas fisicoquímicas. Este procedimiento se llevó a cabo con el fin de preservar las propiedades de las muestras durante el período requerido de 7 días.



Figura 3.10: Almacenamiento de frascos para su traslado a laboratorio

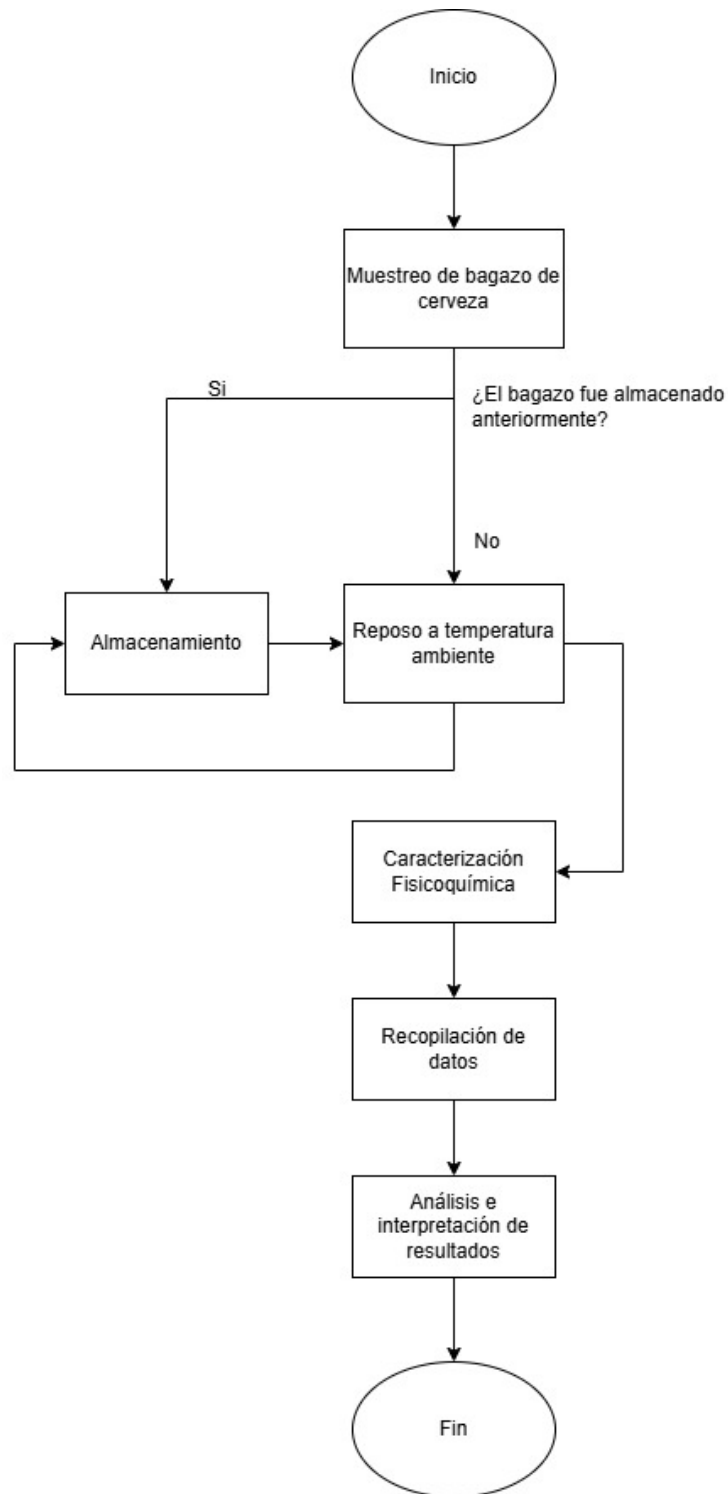


Figura 3.11: Metodología de muestreo y análisis de bagazo de cerveza. Fuente propia

El muestreo del bagazo de cerveza se presenta en la Figura 3.11. Se llevó a cabo en el área de cocción durante el proceso de producción. Para su recolección, se emplearon guantes y una cubeta, con el fin de asegurar una manipulación adecuada del residuo.

Previamente, el bagazo era entregado en bolsas y posteriormente transferido a la cubeta correspondiente (Figura 3.12).



Figura 3.12: Bagazo de cerveza almacenado en bolsa y trasladado en cubeta

En algunas ocasiones, no fue posible realizar el muestreo de forma inmediata tras la generación del residuo. En estos casos, el personal encargado del proceso colaboró mediante el almacenamiento temporal del bagazo, lo que permitió su recolección en un momento posterior. Una vez obtenidas, las muestras fueron trasladadas y almacenadas de forma inmediata.

Cuando el muestreo se realizó directamente en el momento de la generación del residuo, este se mantuvo a temperatura ambiente hasta su almacenamiento (Figura 3.13)

en un refrigerador a una temperatura de  $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2016), el cual se efectuó previo a la realización de los análisis fisicoquímicos correspondientes.



Figura 3.13: Almacenamiento de muestras de bagazo de cerveza

Cabe señalar que se realizaron un total de diez muestreos a lo largo de un año (10 meses), distribuidos en dos periodos semestrales. Esta distribución fue considerada representativa de un ciclo anual del proceso de nixtamalización particular. A lo largo de este periodo se llevaron a cabo las pruebas fisicoquímicas correspondientes siguiendo las directrices de las normas y métodos establecidos, como se detallan en la Tabla ?? . Entre las pruebas realizadas se incluyeron análisis de sólidos, carbono, nitrógeno, DQO, pH, densidad y porcentaje de humedad.

Para obtener estos resultados, se llevaron a cabo previamente los muestreos

correspondientes de cada uno de los residuos. Como se indicó anteriormente, a lo largo del año se se llevaron a cabo un total de 10 pruebas, cada una con 3 réplicas, tanto para el nejayote como para el bagazo de cerveza. Es importante señalar que, debido a las dinámicas de producción variables de las empresas involucradas en esta investigación, se presentaron complicaciones en la programación de las Co-DA, especialmente con respecto a las aguas residuales (nejayote). De acuerdo con las normas vigentes, la caducidad para realizar las pruebas de estas aguas es de 7 días, siendo lo más recomendable realizar las pruebas inmediatamente después de la recolección. A pesar de las restricciones temporales, se logró realizar cinco pruebas para cada una de las Co-DA, con sus respectivas tres réplicas, utilizando las proporciones 25:75, 50:50 y 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza).

Tabla 3.5: Normas y métodos de las pruebas fisicoquímicas

| Consideración        | Fórmula o Dato                         | Fuente               |
|----------------------|--|----------------------|
| Pruebas de Sólidos*  | Método de la norma de Análisis de Agua | NMX-AA-034-SCFI-2015 |
| Pruebas de Carbono   | Método Directo                         | Hach Method 10128    |
| Pruebas de Nitrógeno | Método de Digestión con persulfato     | Hach Method 10072    |
| Pruebas de DQO       | Método de Digestión en Reactor         | Hach Method 8000     |

\* Sólidos Totales, Sólidos Volátiles y Sólidos Suspendidos.

### 3.3.1. Resultados de la Caracterización Fisicoquímica del nejayote y bagazo de cerveza

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los análisis fisicoquímicos realizados al nejayote, al bagazo de cerveza y a las mezclas Co-DA con proporciones de 25:75, 50:50 y 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza). Asimismo, se incluyen tablas que recopilan los parámetros reportados en la literatura para estos mismos residuos, con el objetivo de comparar los resultados experimentales obtenidos y, a partir de dicha comparación, fundamentar el análisis teórico con base en los rendimientos de metano reportados por diversos autores, considerando las similitudes entre los datos.

La Tabla 3.6 muestra los promedios de los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas a los residuos.

Los resultados obtenidos evidencian el efecto de la proporción entre nejayote y bagazo de cerveza sobre las principales características fisicoquímicas de la mezcla

Co-DA.

En primer lugar, el análisis del pH de los residuos reveló que el nejayote utilizado por la empresa presenta una alta alcalinidad (12), manteniéndose dentro del rango promedio (9.8-13.1) reportado en la literatura (Del Angel-Acosta et al., 2021; García-Depraect et al., 2017; López-Pacheco et al., 2019; Meraz et al., 2016; Valderrama-Bravo et al., 2012). Por otro lado, el pH del bagazo de cerveza se registró en el rango ácido, lo cual también coincide con los valores documentados en la literatura científica (Bougrier et al., 2018; Lima Moraes dos Santos et al., 2023; Szaja et al., 2020).

A partir de estos datos, se evidenció que era posible alcanzar la neutralización del pH en la Co-DA; sin embargo, fue necesario determinar la proporción adecuada entre bagazo de cerveza y nejayote para alcanzar dicho equilibrio. Las pruebas de Co-DA realizadas mostraron una disminución progresiva del pH, logrando valores neutros en una proporción 25:75 (nejayote:bagazo de cerveza), lo que indica que esta proporción es óptima para procesos biológicos sensibles a variaciones extremas de pH.

La densidad es un parámetro clave que refleja la concentración de sólidos y la composición física del residuo y/o sustrato. Es decir, indica qué tan concentrado está el sustrato y permite anticipar tanto la carga orgánica disponible como las condiciones de transporte, mezcla y operación del biodigestor. En los resultados obtenidos, la densidad de las mezclas Co-DA mostró un comportamiento creciente con el aumento de la proporción de nejayote. La mezcla con mayor contenido de nejayote (75:25) alcanzó una densidad de  $1032.09 \text{ g/L} \pm 5.88$ , mientras que la mezcla 25:75 presentó una densidad de  $931.92 \pm 91.89 \text{ g/L}$ . Esta tendencia es consistente con la naturaleza del nejayote, que presenta una elevada carga de sales y compuestos disueltos, contribuyendo a una mayor densidad. Por el contrario, el bagazo de cerveza, al tratarse de un residuo lignocelulósico con bajo contenido inorgánico y alta porosidad, cuenta con una menor densidad ( $898.84 \pm 94.32 \text{ g/L}$ ).

Respecto al porcentaje de humedad, los resultados reflejan la capacidad de retención de agua y la naturaleza física de cada residuo. El bagazo de cerveza puro presentó una humedad del  $70.57 \pm 3.46 \%$ , esto se debe a su alta porosidad y contenido de fibra vegetal, que favorece la absorción de agua. A medida que se incrementa la proporción de nejayote en la mezcla, el porcentaje de humedad aumenta, alcanzando un valor máximo de  $90.48 \pm 0.85 \%$ . Este es un comportamiento esperado debido a la naturaleza líquida del nejayote.

El contenido de materia orgánica seca (MOS %) disminuyó conforme aumentó

la proporción de nejayote, pasando de  $21.52 \pm 2.34 \%$  en la Co-DA de 25:75 (nejayote:bagazo de cerveza) a  $9.52 \pm 0.85 \%$  de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza). Este resultado sugiere que la fracción orgánica disponible es mayor en el bagazo de cerveza, mientras que el nejayote presenta una mayor fracción inorgánica o compuestos menos biodegradables.

Los sólidos totales (ST) representan toda la materia sólida contenida en una muestra, tanto orgánica como inorgánica, después de evaporar el agua a  $105^{\circ}\text{C}$  (Secretaría de Economía, 2016). Es decir, en un residuo orgánico los ST son un indicador clave de concentración, tipo de proceso anaerobio aplicable, capacidad de producción de biogás y requisitos de operación. A partir de los resultados obtenidos, el bagazo de cerveza puro presentó mayor cantidad de ST ( $254,405.40 \pm 34,571.09 \text{ mg/L}$ ) en contraste al nejayote, que presentó un valor del 90 % menor de ST ( $25,462.42 \pm 3,954.93 \text{ mg/L}$ ), por lo que conforme incrementaba la proporción de nejayote en la mezcla de Co-DA, el valor de ST disminuyó proporcionalmente.

Por otro lado, los sólidos volátiles (SV) también disminuyeron a medida que se incrementó la proporción de nejayote, indicando una menor carga orgánica. La mayor concentración se observó en el bagazo puro ( $214,820.09 \pm 35,992.36 \text{ mg/L}$ ), mientras que el nejayote mostró un valor considerablemente menor ( $17,523.28 \pm 1884.56 \text{ mg/L}$ ). Lo que implica que entre menor sea la carga orgánica, menor es la capacidad de producir biogás.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), se observó una marcada disminución de  $370,008.75 \pm 28,841.65 \text{ mg/L}$  en el bagazo puro hasta  $32,552.5 \pm 7,415.16 \text{ mg/L}$  en el nejayote, confirmando que el bagazo es la principal fuente de materia orgánica oxidable. La mezcla 25:75 presentó una DQO intermedia ( $317,392.50 \pm 67,245.95 \text{ mg/L}$ ), pero aún elevada, lo que implica un alto potencial energético para procesos como la Co-DA.

El contenido de carbono (C) mostró una tendencia decreciente similar, con valores máximos en el bagazo y mínimos en el nejayote. Asimismo, la concentración de nitrógeno (N) disminuyó drásticamente de  $6,939.88 \pm 1,829.93 \text{ mg/L}$  en el bagazo a  $62.89 \pm 50.86 \text{ mg/L}$  en el nejayote. Esta relación C/N sugiere que las mezclas podrían ser ajustadas para mejorar el balance nutricional en procesos de biodegradación.

En conjunto, los resultados indican que la mezcla 25:75 (nejayote:bagazo de cerveza) representa un punto de equilibrio donde es posible obtener un pH neutro, una adecuada concentración de materia orgánica y una carga de DQO suficiente para procesos

biotecnológicos, sin caer en condiciones de excesiva acidez o alcalinidad.

Tabla 3.6: Características del bagazo de cerveza, Co-DA y Nejayote en diferentes proporciones.

| Características | Proporción (Nejayote:Bagazo de Cerveza) |                        |                        |                        |                      |
|-----------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
|                 | 0:100                                   | 25:75                  | 50:50                  | 75:25                  | 100:0                |
| Densidad (g/L)  | 898.84 ± 94.32                          | 931.92 ± 91.89         | 975.78 ± 62.96         | 1032.09 ± 5.88         | 997.07 ± 17.58       |
| pH              | 5.33 ± 0.24                             | 7.05 ± 1.01            | 9.85 ± 0.94            | 11.00 ± 0.58           | 12 ± 0.72            |
| Humedad (%)     | 70.57 ± 3.46                            | 78.48 ± 2.34           | 84.67 ± 1.98           | 90.48 ± 0.85           | 97.37 ± 0.38         |
| MOS (%)         | 29.43 ± 3.46                            | 21.52 ± 2.34           | 15.33 ± 1.98           | 9.52 ± 0.85            | 2.63 ± 0.38          |
| Cenizas (%)     | 15.81 ± 4.44                            | 10.31 ± 5.10           | 8.18 ± 1.47            | 9.48 ± 1.10            | 30.64 ± 5.69         |
| SV (%)          | 84.19 ± 4.44                            | 89.69 ± 5.10           | 91.82 ± 1.47           | 90.52 ± 1.10           | 69.36 ± 5.69         |
| ST (mg/L)       | 254,405.40 ± 34,571.09                  | 196,179.60 ± 32,092.54 | 144,745.00 ± 26,467.78 | 95,778.80 ± 8,758.88   | 25,462.42 ± 3,954.93 |
| SV (mg/L)       | 214,820.09 ± 35,992.36                  | 175,040.80 ± 24,493.39 | 132,927.00 ± 24,409.59 | 86,695.20 ± 8,037.71   | 17,523.28 ± 1,884.56 |
| STF (mg/L)      | 39,585.31 ± 11,250.2                    | 21,138.80 ± 12,665.81  | 11,818.00 ± 3,120.50   | 9,083.60 ± 1,339.72    | 7,939.14 ± 2,623.38  |
| DQO (mg/L)      | 370,008.75 ± 28,841.65                  | 317,392.50 ± 67,245.95 | 189,627.50 ± 50,205.40 | 145,742.50 ± 60,822.45 | 32,552.5 ± 7,415.16  |
| C (mg/L)        | 60,609.43 ± 28,841.65                   | 53,092.33 ± 23,564.05  | 37,067.00 ± 21,854.00  | 25,780.25 ± 11,588.59  | 7,027.5 ± 3,190.37   |
| N (mg/L)        | 6,939.88 ± 1,829.93                     | 3,838.00 ± 732.98      | 3,812.75 ± 1,066.89    | 2,045.25 ± 278.13      | 62.89 ± 50.86        |

Las Tablas 3.7 y 3.8 presentan una comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y aquellos reportados por otros autores, lo que permitió seleccionar el rendimiento de metano en el que se basó el estudio.

Tabla 3.7: Comparativa de parámetros de caracterización de nejayote con otros estudios.

| Parámetros   | Este estudio                                | Tovar-Gálvez et al., 2012 | Valderrama-Bravo et al., 2012 | Torres-Mendoza et al., 2013 | Ferreira-Rodriguez et al., 2014 | García-Zamora et al., 2015 | Meza et al., 2016 | García-Depraect et al., 2017 | España-Gambou et al., 2018                   | López-Pacheco et al., 2019 | Del Angel-Acosta et al., 2021 | Valderrama-Bravo et al., 2022 |
|--------------|---|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| pH           | 12 ± 0.72                                   | -                         | 11.39 ± 0.49                  | 8 (Ajustado)                | 12 ± 0.11                       | -                          | 11.6              | 12 ± 0.2                     | -  | 9 ± 0.6                    | -                             | -                             |
| Densidad (g) | 97.37 ± 0.38                                | -                         | 97.24 ± 0.26                  | -                           | -                               | -                          | -                 | -                            | -  | 9.8 ± 0.005                | -                             | -                             |
| MOS (%)      | 2.63 ± 0.38                                 | -                         | 2.28 ± 0.18                   | -                           | -                               | -                          | -                 | -                            | -  | -                          | -                             | 2.23 ± 0.02                   |
| ST (mg/L)    | 25,462.42 ± 3,954.93                        | -                         | -                             | -                           | -                               | -                          | 46,523            | 24,466.7 ± 638.9             | -  | 25,000 ± 500               | 9,060 ± 44                    | -                             |
| SV (mg/L)    | 17,523.28 ± 1,884.56                        | -                         | -                             | -                           | -                               | -                          | -                 | 10,203.3 ± 434.2             | -  | -                          | -                             | -                             |
| DQO (mg/L)   | 32,552.5 ± 7,415.16                         | 17,406.34 ± 1,712.80      | 40,058.14 ± 82.22             | 25,138 ± 2745.27            | 24,600 ± 7,720                  | 25,000                     | 28,450            | 25,000 ± 563                 | 22,850 ± 5330                                | 9,153.3                    | 20,905                        | 52,802.22 ± 538.9             |
| C (mg/L)     | 7,027.5 ± 3,190.37                          | -                         | -                             | -                           | -                               | -                          | 9,836             | 8,743.3 ± 45.8               | -  | -                          | -                             | -                             |
| N (mg/L)     | 62.89 ± 50.86                               | -                         | -                             | -                           | -                               | -                          | 418               | 440 ± 21.2                   | -  | 309 ± 7                    | -                             | -                             |
| BMP          | 217.76 ± 40.44 (ind. CH <sub>4</sub> /g SV) | -                         | -                             | -                           | -                               | -                          | -                 | -                            | 292 (L CH <sub>4</sub> /g DQO) (0.84 Metano) | 120.66 ± 10                | -                             | -                             |

La Tabla 3.7 presenta una recopilación de los principales parámetros fisicoquímicos reportados en la literatura para el nejayote, comparados con los obtenidos en el presente estudio. Esta recopilación tiene como objetivo identificar similitudes entre estudios previos y los resultados experimentales actuales, con el fin de fundamentar el análisis teórico, particularmente en lo relacionado con el potencial de producción de metano.

Si bien algunos autores no reportaron todos los parámetros, lo cual limita la comparación en ciertos casos, se observan coincidencias significativas en parámetros clave como sólidos totales (ST) y demanda química de oxígeno (DQO). Es importante destacar que no todos los estudios incluidos se enfocaron en la producción de biogás; por ejemplo, algunos estuvieron orientados a la generación de hidrógeno u otros enfoques relacionados con el tratamiento del nejayote, lo que explica la ausencia de datos sobre el rendimiento de metano (BMP) en la mayoría de los casos.

De los trabajos analizados, solo Tovar Gálvez (2013) y España-Gamboa et al. (2018) reportan valores de BMP, siendo estos los más relevantes para establecer una base comparativa. Entre ambos, el estudio de España-Gamboa et al. (2018) proporciona un mayor número de parámetros que permiten una comparación más integral. Aunque existen diferencias en algunos valores, como en el contenido de nitrógeno, los resultados obtenidos en este estudio muestran una alta similitud con los valores de sólidos totales y DQO reportados por dicho autor.

Por esta razón, el análisis teórico se fundamenta principalmente en el rendimiento de metano reportado por España-Gamboa et al. (2018), al ser el que presenta mayor concordancia con los resultados experimentales del presente estudio.

Tabla 3.8: Comparación de los resultados de la caracterización fisicoquímica de bagazo de cerveza obtenidos con resultados de literatura.

| Características | Este estudio           | Bougrier et al., 2018             | Fabohungbe et al., 2019 | Ferreira et al., 2019 | Mainardis et al., 2019       | Mudzanani et al., 2022 | Polastri et al., 2024a          | Polastri et al., 2024b          | Szaja et al., 2020    |
|-----------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| pH              | 5.33 ± 0.24            | -                                 | -                       | -                     | 5.8                          | 5.12                   | 5.82 ± 0.02                     | 5.46                            | 6.19 ± 0.64           |
| Humedad (%)     | 70.57 ± 3.46           | -                                 | -                       | 78.8                  | 84                           | 78                     | 79.97 ± 0.26                    | 73.93                           | -                     |
| MOS (%)         | 29.43 ± 3.46           | -                                 | -                       | 21.2                  | 16                           | 22                     | 20.03 ± 0.26                    | 26.07                           | -                     |
| SV (%)          | 84.19 ± 4.44           | -                                 | -                       | 86.8                  | 97.15                        | 91                     | 96.65 ± 0.05                    | 96                              | -                     |
| ST (mg/L)       | 254,405.40 ± 34,571.09 | 219,569.6 ± 11,028                | 229,700 ± 50 mg/kg      | -                     | -                            | -                      | -                               | -                               | 223,900 ± 4,300 mg/kg |
| SV (mg/L)       | 214,820.09 ± 35,992.36 | 205,879.2 ± 9,592                 | 221,600 ± 30 mg/kg      | -                     | -                            | -                      | -                               | -                               | 215,100 ± 2,900 mg/kg |
| DQO (mg/L)      | 370,008.75 ± 28,841.65 | 292,468.8 ± 21,102.4              | -                       | -                     | 41,500 (DQOs)                | 23,997                 | -                               | 1,707.50 (DQOs)                 | 72,623 ± 3,144        |
| C (mg/L)        | 60,609.43 ± 28,841.65  | -                                 | 474,800 ± 840 mg/kg     | 48.3 %                | 47.5 %                       | -                      | 48.1 ± 0.45 %                   | 47.08 %                         | -                     |
| N (mg/L)        | 6,939.88 ± 1,829.93    | 10,400 ± 800 mg/kg                | 34,000 ± 250            | 5.5 %                 | 2.9 %                        | -                      | 4.37 ± 0.32 %                   | 4 %                             | 877 ± 359             |
| BMP             | -                      | 333 ± 15 L CH <sub>4</sub> /kg SV | -                       | -                     | 356 L CH <sub>4</sub> /kg SV | -                      | 308.77 L CH <sub>4</sub> /kg SV | 445.62 L CH <sub>4</sub> /kg SV | -                     |

La Tabla 3.8 presenta una comparación de los parámetros fisicoquímicos del bagazo de cerveza entre el presente estudio y diversas fuentes de la literatura. Esta recopilación tiene como propósito identificar trabajos previos con características similares que permitan sustentar el análisis teórico, particularmente respecto al potencial de producción de metano (BMP).

Aunque varios de los estudios considerados incluyen datos relevantes, muchos de ellos los presentan en diferentes unidades o formatos (por ejemplo, en porcentaje en lugar de concentración), lo que dificulta una comparación directa. Además, en la mayoría de los casos, los valores reportados no muestran similitud significativa con los obtenidos en este estudio.

En este contexto, Bougrier et al. (2018) se destaca como la referencia más pertinente, ya que reporta un conjunto amplio de parámetros (ST, SV, DQO, N) en las mismas unidades utilizadas en este trabajo, además de un valor de BMP (333 ± 15 L CH<sub>4</sub>/kg SV) cercano al perfil del residuo analizado. Esta coincidencia en datos clave justifica su elección como base para el análisis comparativo.

En conjunto, la información recopilada permite validar la caracterización del bagazo de cerveza obtenida en el laboratorio y, al mismo tiempo, resalta la pertinencia de utilizar el estudio de Bougrier et al. (2018) como base para proyectar el rendimiento metanogénico de este residuo.

### 3.4. Estudio de potencial de metano del nejayote y bagazo de cerveza a partir de DA

La caracterización fisicoquímica, así como los rendimientos de metano reportados en la literatura por los autores España-Gamboa et al. (2018) y Bougrier et al. (2018) que obtuvieron datos similares a los de nuestros residuos, fueron elementos clave para realizar el cálculo del potencial de metano de ambos residuos. En la Tabla 3.9 se presentan las consideraciones correspondientes a este apartado.

Tabla 3.9: Consideraciones para el cálculo de potencial teórico de metano

| Consideración                          | Fórmula o Dato   | Fuente  |
|--|--|---|
| Valor Calorífico de GLP                | 46.16 MJ/kg<br>26 kWh/m <sup>3</sup>   | INECC, 2014<br>FAO, 2011                            |
| Valor Calorífico de Metano             | 10 kWh/m <sup>3</sup>  | FAO, 2011   |
| Rendimiento de metano de residuos      | Nejayote = 282 L CH <sub>4</sub> /kg DQO<br>Bagazo de cerveza = 333 L CH <sub>4</sub> /kg SV | España Gamboa et al., 2018<br>Bougrier et al., 2018 |
| Cálculo de Potencial Teórico de Metano | $\text{CMP} = \frac{\text{SMP}_N \cdot M_N + \text{SMP}_{bgz} \cdot M_{bgz}}{M_N + M_{bgz}}$ | Du et al., 2019                                     |

Además de los rendimientos reportados en la literatura, se consideraron los valores caloríficos del GLP y el metano, así como la fórmula que se encuentra en la Tabla 3.9 para el cálculo del potencial de metano que se utilizó en un estudio de 2019 encontrado en la literatura científica (Du et al., 2019).

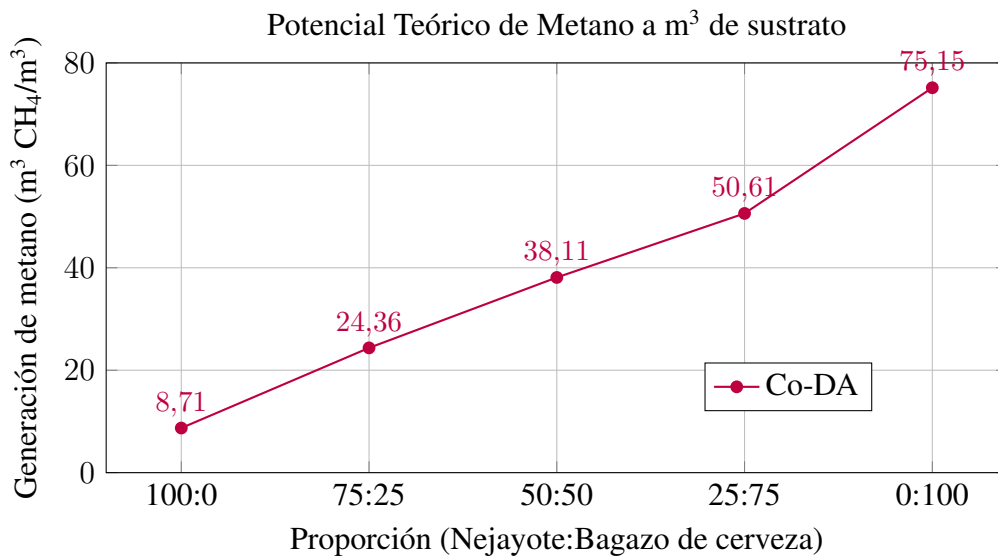


Figura 3.14: Comportamiento de generación de metano de nejayote, bagazo de cerveza y codigestiones de ambos residuos.

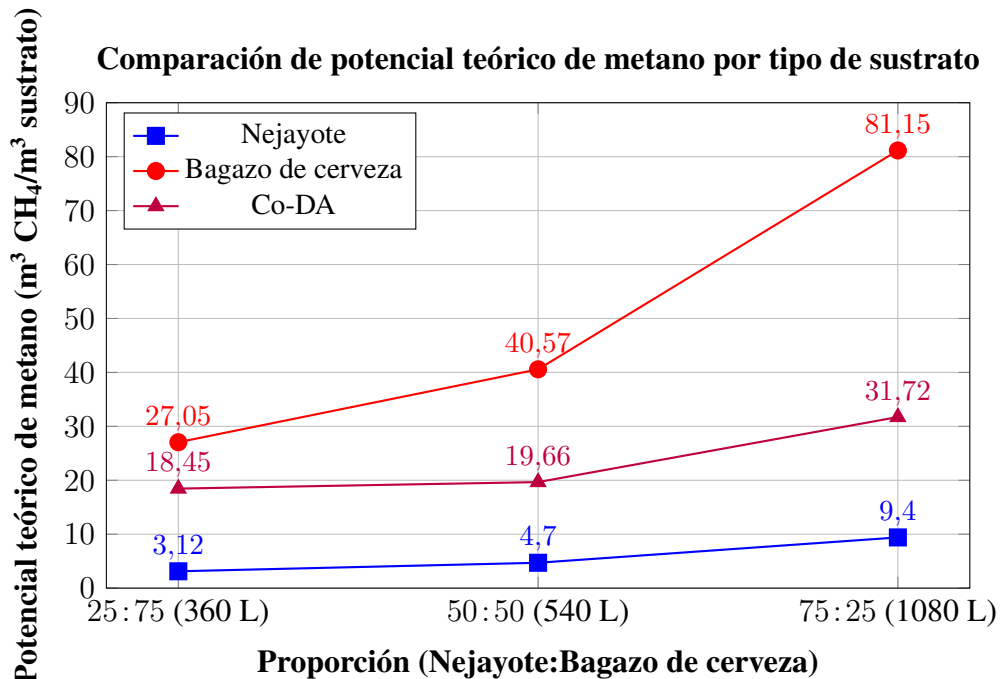
La Figura 3.14 muestra la relación entre la proporción de nejayote y bagazo de cerveza, utilizando un metro cúbico de sustrato, así como el comportamiento de la generación teórica de metano ( $m^3 \text{ CH}_4/m^3$  de sustrato) en un proceso de co-digestión anaeróbica (Co-DA).

El eje X representa la proporción de los residuos en la mezcla, desde 100 % nejayote hasta 100 % bagazo de cerveza. El eje Y indica el volumen de metano generado por metro cúbico de sustrato.

Se observa que, en la proporción 100:0 (solo nejayote), la generación de metano fue la más baja ( $8.71 m^3 \text{ CH}_4/m^3$ ), mientras que en la proporción 0:100 (solo bagazo de cerveza) fue la más alta ( $75.15 m^3 \text{ CH}_4/m^3$ ). Las mezclas intermedias mostraron un aumento progresivo en la producción de metano conforme creció la proporción de bagazo, indicando que este residuo mejora notablemente el rendimiento energético de la codigestión.

Este comportamiento refleja no solo la mayor biodegradabilidad del bagazo de cerveza, sino también su potencial como co-sustrato para optimizar la generación de biogás. Sin embargo, es importante señalar que el nejayote, aunque limitado energéticamente, representa un residuo de alta carga orgánica que requiere tratamiento. Por ello, su inclusión en sistemas de codigestión anaerobia no solo busca aprovechar su contenido energético, sino también contribuir al tratamiento de aguas residuales industriales. En este contexto, el bagazo de cerveza actúa como un potenciador energético, favoreciendo

tanto la producción de metano como la gestión adecuada del nejayote.



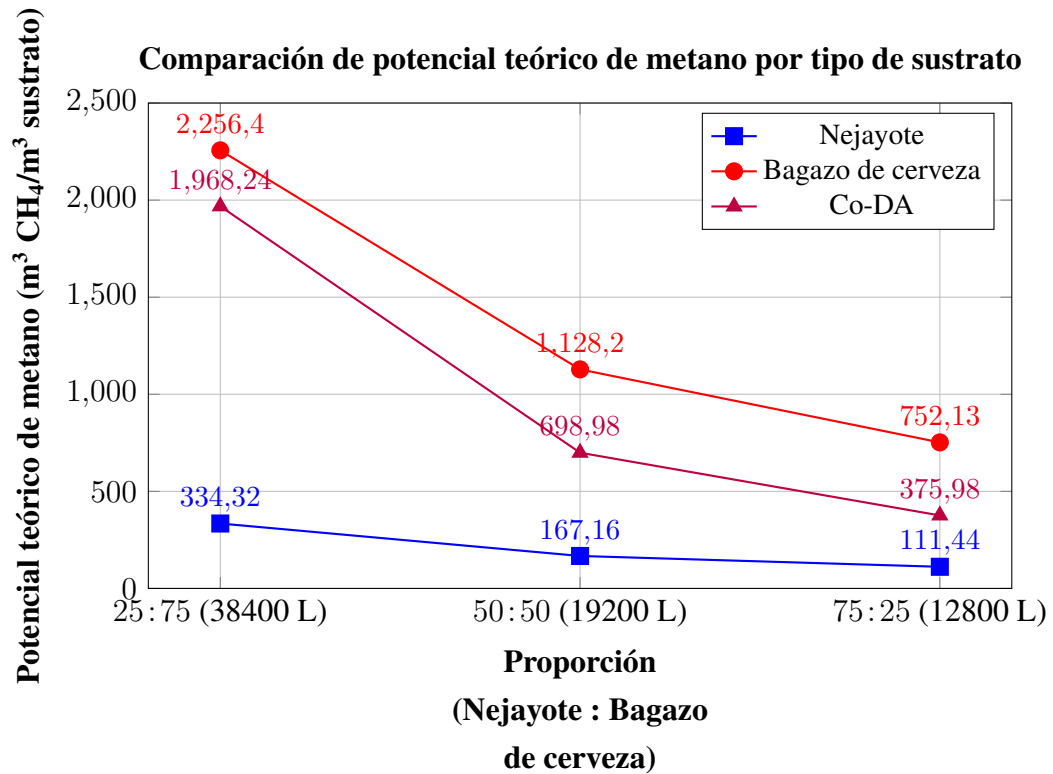
Gráfica 3.15: Generación de metano a partir de la generación mensual de bagazo de cerveza de la cervecería artesanal del estudio.

La Gráfica 3.15 presenta la generación teórica de metano a partir de un enfoque basado en la dinámica real de producción de bagazo de cerveza en una cervecería artesanal, la cual genera 270 litros al mes. A partir de este volumen constante, se calcularon las proporciones de codigestión con nejayote a analizar (nejayote:bagazo de cerveza). Así, para una proporción 25:75 se consideraron 90 L de nejayote (360 L totales de sustrato); para 50:50, 270 L de nejayote (540 L totales); y para 75:25, 810 L de nejayote (1,080 L totales). Adicionalmente, la gráfica compara la generación de metano que se obtendría utilizando únicamente nejayote o únicamente bagazo, considerando los mismos volúmenes totales de sustrato en cada proporción. Esto permite observar cómo varía la producción de metano según la mezcla, pero también cómo se comportan ambos residuos por separado dentro de esos escenarios.

La Gráfica 3.15 permite observar con mayor detalle el comportamiento descrito en la Gráfica 3.14, ahora considerando la dinámica real de generación de bagazo de cerveza (270 L/mes). En este contexto, la Co-DA evidencia que el bagazo actúa como un potenciador energético del nejayote, mejorando notablemente la generación de metano.

Aunque el bagazo de cerveza, por sí solo, muestra una mayor capacidad de generación de metano que cualquier proporción de Co-DA, es importante considerar que su tratamiento

mediante DA requiere dilución con agua potable para mantener un porcentaje adecuado de sólidos y evitar inhibiciones. En cambio, el nejayote, además de aportar materia biodegradable, actúa como medio líquido, reduciendo la necesidad de agua adicional. Por ello, la Co-DA no solo mejora la producción de metano, sino que también representa una opción más sostenible y eficiente para el tratamiento conjunto de ambos residuos.



Gráfica 3.16: Generación de metano a partir de la generación mensual de nejayote de la empresa de nixtamalización.

La Gráfica 3.16 presenta la generación teórica de metano a partir de un enfoque basado en la dinámica real de producción de nejayote en la empresa de nixtamalización, la cual genera 9,600 litros al mes. A partir de este volumen constante, se calcularon las proporciones de codigestión con bagazo de cerveza a analizar (nejayote:bagazo de cerveza). Así, para una proporción 25:75 se consideraron 28,800 L de bagazo de cerveza (38,400 L totales de sustrato); para 50:50, 9,600 L de bagazo de cerveza (19,200 L totales); y para 75:25, 3,200 L de bagazo de cerveza (12,800 L totales). Adicionalmente, la gráfica compara la generación de metano que se obtendría utilizando únicamente nejayote o únicamente bagazo, considerando los mismos volúmenes totales de sustrato en cada proporción. Esto permite observar cómo varía la producción de metano según la mezcla, pero también cómo se comportan ambos residuos por separado dentro de esos escenarios.

Aunque esta generación implica una gran cantidad de litros, no es constante ya que ocurre en lapsos de 2 días, con una producción de 2,400 a 4,800 litros por semana. Por otro lado, al considerar una sola micro-cervecería, la generación de bagazo por cocción es de 60 kg (aproximadamente 260 L) por semana. Sin embargo, esta producción solo ocurre en temporada alta (noviembre), por lo que no se puede garantizar su continuidad. Este factor es crucial en el proceso de Co-DA, ya que, si no se dispone de la cantidad suficiente de residuo orgánico, será necesario hacer ajustes para evitar que se vea afectado el proceso de generación de biogás.

Por lo anterior, para determinar las proporciones requeridas, se puede trabajar con más micro-cervecerías artesanales dispuestas a otorgar su residuo, lo que permitiría potenciar la generación de metano hasta alcanzar las cantidades necesarias. Sin embargo, este enfoque representa un desafío, ya que, por ejemplo, para la generación de 2,400 L de nejayote, se requerirían 7,200 L de bagazo de cerveza, lo que equivale a aproximadamente 27 micro-cervecerías artesanales, considerando que todas generan la misma cantidad de bagazo semanalmente.

En el caso hipotético de alcanzar dichos volúmenes, es fundamental considerar la carga al reactor anaerobio en función del porcentaje de sólidos, Parámetro que varía según la tecnología de digestión empleada. No obstante, al manejar dicha proporción, se produce una sobrecarga de sólidos, alcanzando una concentración del 24 % de sólidos totales lo cual podría comprometer la eficiencia del proceso. En contraste, una proporción de 50:50, reducen la concentración de sólidos al 17 %, un valor potencialmente más adecuado para evaluar la viabilidad técnica y operativa del sistema de digestión anaerobia (Shah et al., 2024). En el presente estudio, se abordó el aprovechamiento energético del nejayote generado por una empresa nixtamalera como residuo base. La proporción de bagazo de cerveza en los ensayos de codigestión anaerobia fue determinada en función de la disponibilidad real del residuo, limitada a una única micro-cervecería artesanal que accedió a participar en la investigación. La caracterización fisicoquímica de ambos sustratos y de sus mezclas en diferentes proporciones (25:75, 50:50 y 75:25, nejayote:bagazo de cerveza) permitió evaluar el potencial de metano en diversos escenarios. Esta información resulta relevante para el diseño de sistemas flexibles de codigestión, capaces de ajustarse a la oferta variable de residuos orgánicos en función de la capacidad de generación de cada industria involucrada.

Por otro lado, también es crucial considerar el volumen de trabajo del reactor, ya que este aspecto es determinante para el cálculo de inversión y la viabilidad de la propuesta. De acuerdo con las dinámicas del proceso de nixtamalización, se considera la

implementación de una tecnología tipo CSTR, caracterizada por una agitación continua y una dinámica de ingreso de sustrato semicontinua. Esta configuración está diseñada para la generación de metano a partir del nejayote puro, y en los casos en que se disponga de bagazo de cerveza, este se integrará al sistema mediante Co-DA, considerando la cantidad real disponible de este residuo por parte de la micro-cervecería colaboradora. Por lo tanto, la proporción de mezcla no se define de manera fija, sino que depende de la disponibilidad del bagazo, manteniendo al nejayote como componente predominante. Debido a las características físicas del bagazo, se considera necesario aplicar un pretratamiento físico, como dilución o desintegración, con el objetivo de ajustar el contenido de sólidos y favorecer una adecuada mezcla con el nejayote, asegurando así la estabilidad y eficiencia del proceso. De acuerdo con los resultados obtenidos, si bien la producción de metano a partir de nejayote es inferior en comparación con la generada mediante Co-DA o utilizando bagazo de cerveza como sustrato, este proceso permite una generación significativa de biogás además de contribuir eficazmente al tratamiento de las aguas residuales provenientes del proceso de nixtamalización.

En el caso de disponer de mayor volumen de bagazo de cerveza, se ha demostrado que cualquier proporción mejora la producción de metano. Dado que el residuo de nejayote es el principal desecho generado por la empresa nixtamalera y presenta una alta disponibilidad, se busca priorizar su tratamiento dentro del sistema propuesto. En este contexto, se identificó que la proporción de 75 % nejayote y 25 % bagazo de cerveza resulta óptima, no solo por favorecer la generación de metano a través de la codigestión anaerobia, sino también porque permite alcanzar una concentración de sólidos totales cercana al 10 %, valor considerado adecuado para tecnologías de digestión anaerobia de tipo flujo continuo de tanque agitado (CSTR, por sus siglas en inglés). Esta proporción, por tanto, representa un equilibrio entre aprovechamiento energético y viabilidad técnica del proceso.

A partir de este análisis, se llevó a cabo un estudio tecnoeconómico, que consideró tanto los escenarios de producción mínima y máxima de biogás a partir de nejayote, como aquellos derivados de la codigestión con bagazo de cerveza empleando disponibilidades mínimas y máximas de este coproducto (60 kg y 800 L, respectivamente), bajo una proporción de mezcla de 75:25.

### 3.4.1. Resultados del análisis potencial de biometano y sus efectos en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente

En este apartado se presentan los resultados obtenidos respecto a la generación de metano y los impactos ambientales asociados, como la reducción en el consumo de GLP y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a partir de las consideraciones previamente establecidas.

Se analizaron tres casos. El caso 1 corresponde al tratamiento mediante digestión anaerobia (DA) del nejayote, considerando su disponibilidad real. El caso 2 contempla la codigestión de nejayote y bagazo de cerveza, en función de la disponibilidad real de ambos residuos, tal como fueron cuantificados en las empresas participantes. Finalmente, el caso 3 implica la codigestión en una proporción 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza), en donde se mantiene la disponibilidad real del nejayote, y se ajusta la cantidad de bagazo requerida para cumplir dicha proporción. En la primera etapa del estudio se analiza el potencial de generación de metano, la reducción del consumo de GLP y la mitigación de GEI asociados al tratamiento de estos residuos orgánicos.

Tabla 3.10: Caso 1: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de digestión anaeróbica del nejayote generado por la empresa de nixtamalización analizada.

| Recurso      | Cantidad                | Costo (\$MXN)                      | Impacto Ambiental (ton CO <sub>2</sub> eq) |
|--------------|-------------------------|------------------------------------|--|
| Agua         | 691,200 a 1,382,400 (L) | 71,934.77 a 151,998.53             | 12.55 a 25.1 (eliminados)                  |
| Maíz         | 48,000 a 96,000 (kg)    | 2,640,000 a 5,280,000              | —  |
| Cal          | 480 a 960 (kg)          | 3,360 a 6,720                      | —  |
| GLP          | 19,200 a 38,400 (L)     | —                                  | 3.25 a 6.5                                 |
| <b>Total</b> | —                       | <b>2,715,294.77 a 5,438,718.53</b> | <b>9.3 a 18.6 (eliminados)</b>             |

La Tabla 3.10 presenta una estimación anual de los recursos utilizados, los costos asociados y los impactos ambientales mitigados para el Caso 1, el cual contempla el tratamiento del nejayote mediante digestión anaerobia (DA) en la empresa nixtamalera. Se observa una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero (entre 9.3 y 18.6 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente), resultado tanto de la eliminación de carga contaminante presente en las aguas residuales como de la sustitución del gas LP (GLP) por biometano generado in situ, lo que permite cubrir por completo la demanda

energética del proceso de nixtamalización.

Desde el punto de vista económico, aunque se mantienen los costos asociados al consumo de agua, maíz y cal, se elimina el gasto por concepto de combustible GLP gracias al autoabastecimiento energético proporcionado por el metano generado. El rango de costos totales anuales se estima entre \$2,715,294.77 y \$5,438,718.53 MXN, dependiendo del volumen procesado.

En conjunto, esta evaluación demuestra que el Caso 1 representa una alternativa técnica y ambientalmente viable, al integrar la gestión de residuos y la autosuficiencia energética en una sola solución.

Tabla 3.11: Caso 2: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de codigestión anaeróbica del nejayote y bagazo de cerveza generado en las empresas involucradas en el estudio.

| <b>Recurso</b> | <b>Cantidad</b>            | <b>Costo (\$MXN)</b>                   | <b>Impacto Ambiental<br/>(ton CO<sub>2</sub> eq)</b> |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Agua           | 691,200 a 1,382,400<br>(L) | 71,934.77 a 151,998.53                 | 16.26 a 32.53<br>(eliminados)                        |
| Maíz           | 48,000 a 96,000 (kg)       | 2,640,000 a 5,280,000                  | —  |
| Cal            | 480 a 960 (kg)             | 3,360 a 6,720                          | —  |
| GLP            | 19,200 a 38,400 (L)        | —                                      | 4.75 a 9.5   |
| <b>Total</b>   | —                          | <b>2,902,494.77 a<br/>5,813,118.53</b> | <b>11.51 a 23.03<br/>(eliminados)</b>                |

La Tabla 3.11 muestra el potencial de reducción de GEI en el caso 2, que considera la disponibilidad real de ambos residuos nejayote y bagazo de cerveza provenientes de las empresas participantes. Al igual que en el caso anterior, el sistema logra el autoabastecimiento de combustible mediante la generación de biometano, eliminando la necesidad de adquirir GLP.

En términos de impacto ambiental, se observa una mayor reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente. Esto se debe tanto al incremento en la generación de biometano como al tratamiento de un mayor volumen de materia biodegradable, resultado del co-tratamiento de residuos. Dicha combinación permite una disminución más significativa de la carga contaminante en aguas residuales, traduciéndose en un beneficio ambiental

superior al observado en el caso 1.

Así, el escenario 2 no solo refuerza la viabilidad técnica del sistema, sino que demuestra un mayor potencial ambiental al aprovechar de manera conjunta los residuos disponibles.

Tabla 3.12: Caso 3: Evaluación del potencial de generación de metano a partir del tratamiento de codigestión anaeróbica utilizando la proporción óptima determinada de nejayote:bagazo de cerveza (75:25).

| <b>Recurso</b> | <b>Cantidad</b>            | <b>Costo (\$MXN)</b>                   | <b>Impacto Ambiental<br/>(ton CO<sub>2</sub> eq)</b> |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Agua           | 691,200 a 1,382,400<br>(L) | 71,934.77 a 151,998.53                 | 80.44 a 160.89<br>(eliminados)                       |
| Maíz           | 48,000 a 96,000 (kg)       | 2,640,000 a 5,280,000                  | —  |
| Cal            | 480 a 960 (kg)             | 3,360 a 6,720                          | —  |
| GLP            | 19,200 a 38,400 (L)        | —                                      | 19.6 a 39.2  |
| <b>Total</b>   | —                          | <b>2,715,294.77 a<br/>5,438,718.53</b> | <b>60.84 a 121.69<br/>(eliminados)</b>               |

La Tabla 3.12 presenta el mismo análisis realizado en los casos anteriores, con la diferencia de que en este escenario se considera la generación real de nejayote por parte de la empresa nixtamalera, así como el volumen de bagazo de cerveza necesario para alcanzar una proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza).

Al igual que en los casos previos, se alcanza el autoabastecimiento energético mediante el uso de biometano, lo que permite eliminar el consumo de GLP. Sin embargo, la principal diferencia de este caso se encuentra en el impacto ambiental, el cual resulta significativamente más favorable. Esto se debe a la alta biodegradabilidad del bagazo de cerveza y al mayor volumen de residuos tratados, lo que maximiza la eficiencia del proceso de codigestión anaeróbica.

En conjunto, estos resultados refuerzan la viabilidad técnica y ambiental del co-tratamiento de ambos residuos bajo esta proporción específica, consolidando su potencial como alternativa sostenible para el manejo integral de residuos orgánicos.

A continuación, se presenta un análisis comparativo de la generación de biometano

y su equivalencia energética respecto al combustible GLP, así como del impacto ambiental asociado al uso de agua y la combustión de combustible en los distintos escenarios analizados, en contraste con el caso base correspondiente al proceso convencional de nixtamalización.

Estas gráficas constituyen la base para un estudio posterior, en el cual se determina la cantidad de biometano necesaria para cubrir los requerimientos energéticos del sistema de codigestión anaeróbica incluyendo el tanque de pretratamiento térmico y la regulación térmica del biodigestor, así como la porción excedente que podría destinarse a una venta teórica. Este enfoque permite establecer una visión integral tanto del aprovechamiento energético como del potencial económico y ambiental del sistema.

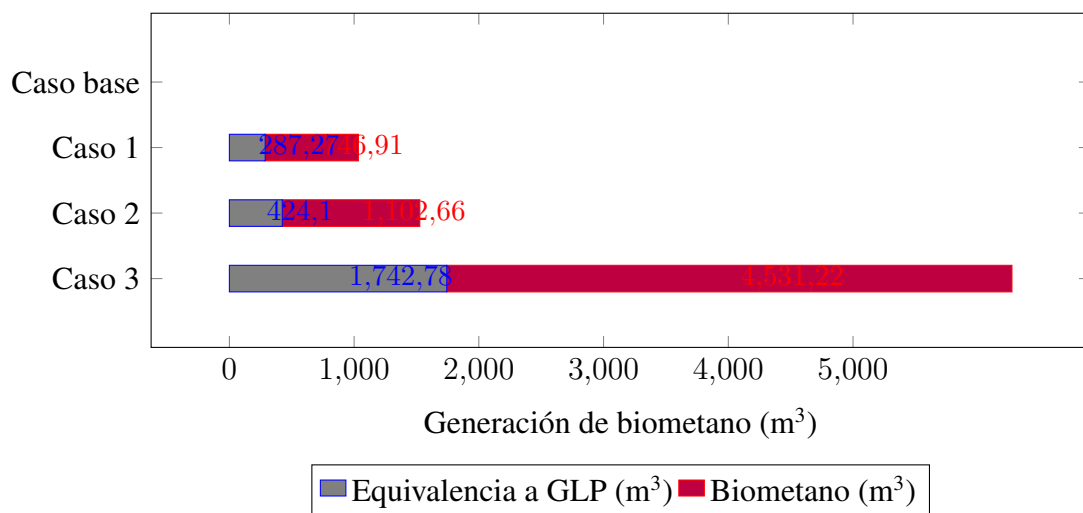


Figura 3.17: Generación teórica de biometano en los casos de estudio.

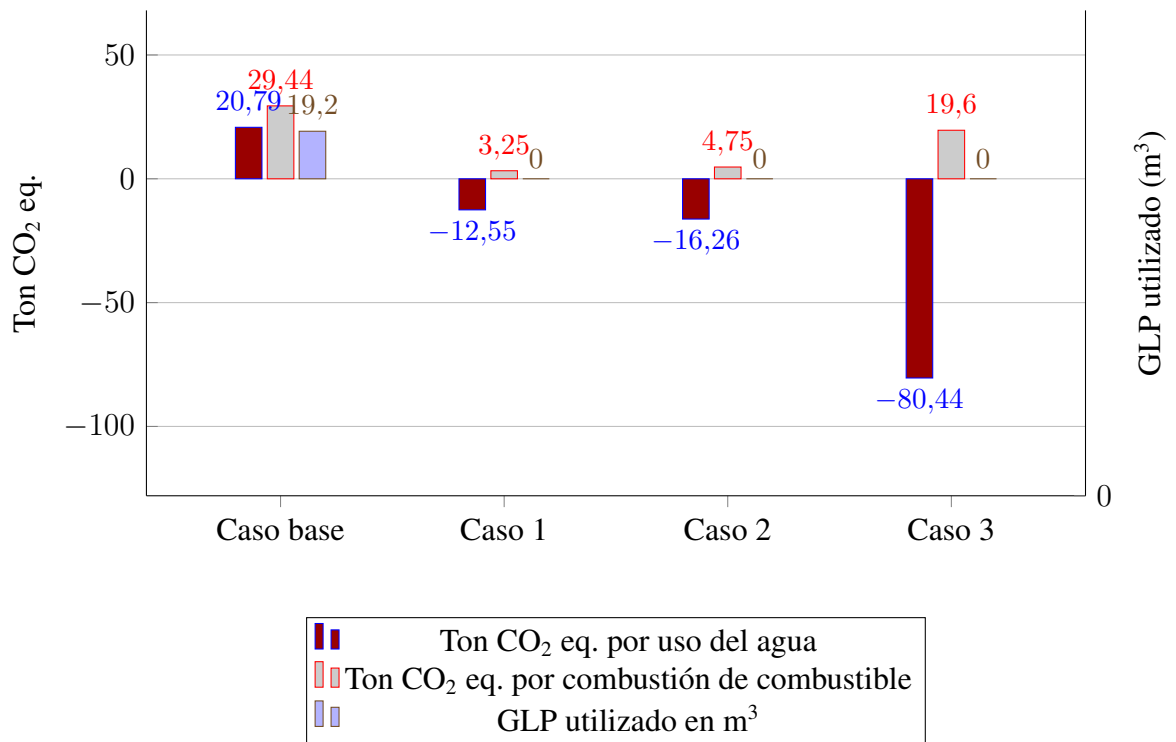


Figura 3.18: Impacto ambiental en los diferentes casos de estudio.

La Figura 3.17 muestra la generación teórica de biometano para los diferentes escenarios evaluados, expresada en metros cúbicos (m<sup>3</sup>). Se observa un aumento progresivo en la producción de biometano desde el Caso 1 hasta el Caso 3, siendo este último el que alcanza el mayor volumen con 4,531.22 m<sup>3</sup>, seguido por el Caso 2 (1,102.66 m<sup>3</sup>) y el Caso 1 (746.91 m<sup>3</sup>). La producción de biometano también se presenta en términos de su equivalencia energética con GLP, lo cual permite dimensionar su potencial como sustituto de este combustible fósil.

La Figura 3.18 complementa estos resultados al mostrar el impacto ambiental asociado a cada escenario, medido en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub> eq) y volumen de GLP utilizado.

En el Caso base, se registra un uso de 19.2 m<sup>3</sup> de GLP y las emisiones más altas, tanto por uso de agua (20.79 t CO<sub>2</sub> eq) como por combustión (29.44 t CO<sub>2</sub> eq). En contraste, en los Casos 1, 2 y 3 se elimina completamente el uso de GLP, gracias a la producción suficiente de biometano, lo que reduce notablemente las emisiones derivadas de la combustión.

Apesar de que el uso de biometano sigue generando emisiones por combustión, estas son significativamente menores en comparación con las del GLP en el caso base.

Además, se observa un impacto ambiental negativo en las emisiones por uso del agua, especialmente en el Caso 3, donde se reporta una reducción de -80.44 t CO<sub>2</sub> eq, lo cual sugiere que el sistema actúa como un sumidero de carbono, debido al aprovechamiento y tratamiento del nejayote como residuo orgánico.

Estos resultados indican que el aprovechamiento del nejayote, especialmente en combinación con otros residuos como el bagazo de cerveza, no solo maximiza la producción de biometano, sino que también reduce considerablemente la huella de carbono del sistema, lo que refuerza su viabilidad ambiental y energética.

### **3.5. Análisis de prefactibilidad de la propuesta tecnológica**

El estudio de prefactibilidad considera el análisis del flujo de caja, entendido como el registro de las entradas y salidas de capital dentro de la empresa. Este tipo de evaluación suele realizarse desde una perspectiva general de la organización; sin embargo, en este caso, el análisis económico se enfoca exclusivamente en el proceso de producción.

En el caso particular de la empresa nixtamalera, el flujo de caja incluye los costos asociados con la adquisición de insumos clave tales como: maíz, agua, cal y GLP. Con la implementación de un sistema de tratamiento del nejayote mediante codigestión anaeróbica con bagazo de cerveza, se estima que la producción de biogás será suficiente para cubrir el 100 % del consumo actual de GLP. La diferencia entre los escenarios evaluados radica en volumen acumulado de biogás generado.

Al considerar la inversión inicial requerida para la instalación de la tecnología, el retorno de inversión se proyecta con base en la eliminación del gasto en GLP, gracias al autoabastecimiento energético a partir del biogás producido. Asimismo se considera la variabilidad del precio del GLP debido a la inflación, así como la conversión energética del biogás a su equivalente en GLP, lo que representa una posible fuente de ingresos adicionales para la empresa, en caso de que exista un excedente que pueda ser comercializado.

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron diversos indicadores económicos, todos centrados en el modelo de flujo de caja. Los principales indicadores considerados fueron los siguientes:

- Evaluación económica de producción

$$CA = IA - CO\&M \quad (3.1)$$

Donde:

- $CA$  es el costo anual,
- $IA$  es el ingreso anual,
- $CO\&M$  es el costo de operación y mantenimiento.

- VAN (Valor Actual Neto)

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (3.2)$$

Donde:

- $FC_t$ : Flujo de caja en el periodo  $t$
- $i$ : Costo de capital
- $n$ : Vida útil del proyecto
- $I_0$ : Inversión inicial

- Retorno de Inversión (ROI)

$$ROI(\%) = \frac{\text{Beneficio Neto Actual}}{\text{Inversión Total de Capital}} \quad (3.3)$$

- Tiempo de Recuperación (y)

$$y = \frac{\text{Inversión Total de Capital}}{\text{Beneficio Neto Actual}} \quad (3.4)$$

El estudio de prefactibilidad se realizó para los distintos escenarios derivados del caso base. Se consideró la implementación de un reactor tipo CSTR de 9 m<sup>3</sup> y un tanque de pretratamiento térmico de acero inoxidable de 5 m<sup>3</sup>, ambos contemplados dentro de la inversión inicial estimada, la cual asciende a \$USD 41,538.89, conforme a referencias bibliográficas recientes (Kim et al., 2022; Park et al., 2025).

Si bien el monto de inversión puede parecer significativo, se espera que la generación de biometano cubra por completo las necesidades energéticas actuales, eliminando el gasto asociado al consumo de GLP. El impacto económico y el retorno de inversión

serán abordados con mayor detalle en las siguientes secciones, donde se analiza el aprovechamiento del biometano tanto para el proceso interno como para una potencial venta del excedente.

Además, se evaluó un costo anual de operación y mantenimiento. Los costos de operación y mantenimiento en proyectos de digestión anaeróbica suelen representar entre el 10 % y el 20 % del costo de inversión inicial (cita). Por ello, en este estudio se consideraron tres escenarios para su evaluación: 10 % como un escenario de bajo costo, 15 % como un costo intermedio o promedio, y 20 % como un escenario de costo elevado. Esta variación permite analizar cómo diferentes condiciones pueden influir en el costo total del sistema. A su vez, se consideró la venta teórica del biogás generado. Para ello, se calculó un coeficiente de proporción entre el poder calorífico del metano y el del GLP, ambos expresados en kWh/m<sup>3</sup>. Este coeficiente permitió estimar la cantidad equivalente de GLP (litros) correspondiente al volumen de metano producido (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>). Posteriormente, dicha equivalencia se multiplicó por el precio comercial del GLP (MXN/litro), obteniendo así un valor aproximado en pesos mexicanos para la venta teórica del biogás. Este análisis incluyó el suministro parcial de biogás tanto al sistema de producción de nixtamalización como al sistema de codigestión anaeróbica propuesto. La distribución del biogás se determinó mediante un cálculo que consideró primero el biometano generado y su conversión a kWh utilizando el poder calorífico del metano. Posteriormente, se restó la energía necesaria para cada uno de los procesos (tanque de pretratamiento térmico, biodigestor y nixtamalización), obteniendo la energía neta disponible. Esta energía neta se convirtió nuevamente a volumen de biometano (m<sup>3</sup>) utilizando el poder calorífico del metano, lo que permitió calcular la cantidad de biogás destinado a cada sistema y, finalmente, el biometano que podría ser teóricamente vendido.

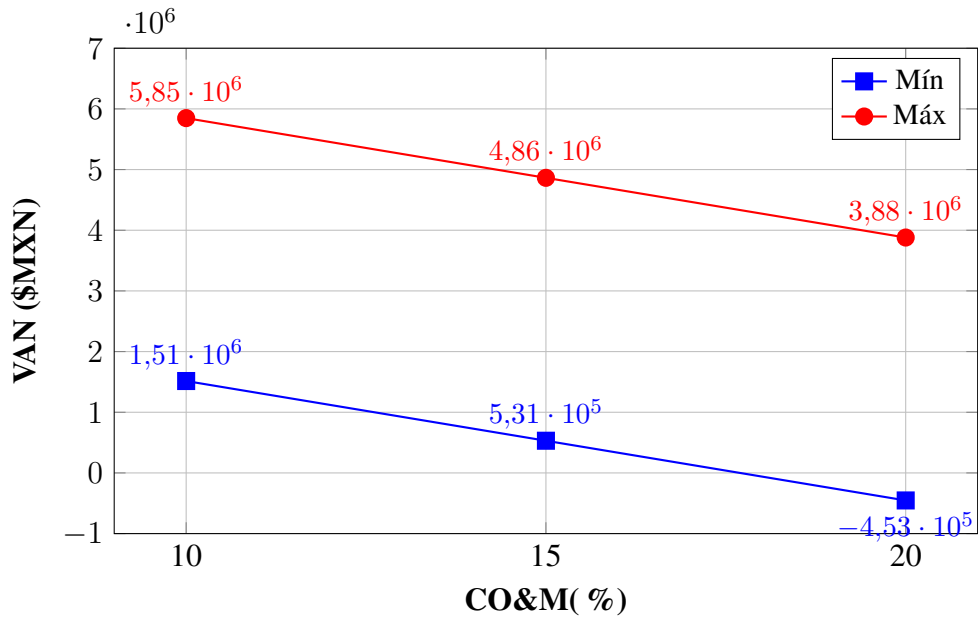
### **3.5.1. Resultados del estudio económico**

El análisis anterior permitió delimitar el estudio económico para los casos mencionados, los cuales se conformaron a partir de distintos escenarios, definidos según las consideraciones que se explican a continuación.

Para el escenario 1, se consideró la reducción del costo asociado al uso de combustible GLP, estimado en un rango de 187,200 a \$374,000 MXN. Como se mencionó anteriormente, en todos los casos analizados se satisfacen las necesidades energéticas mediante combustible GLP; por lo tanto, este valor permanece constante en todos los escenarios evaluados. En cuanto al costo de operación y mantenimiento (CO&M) se

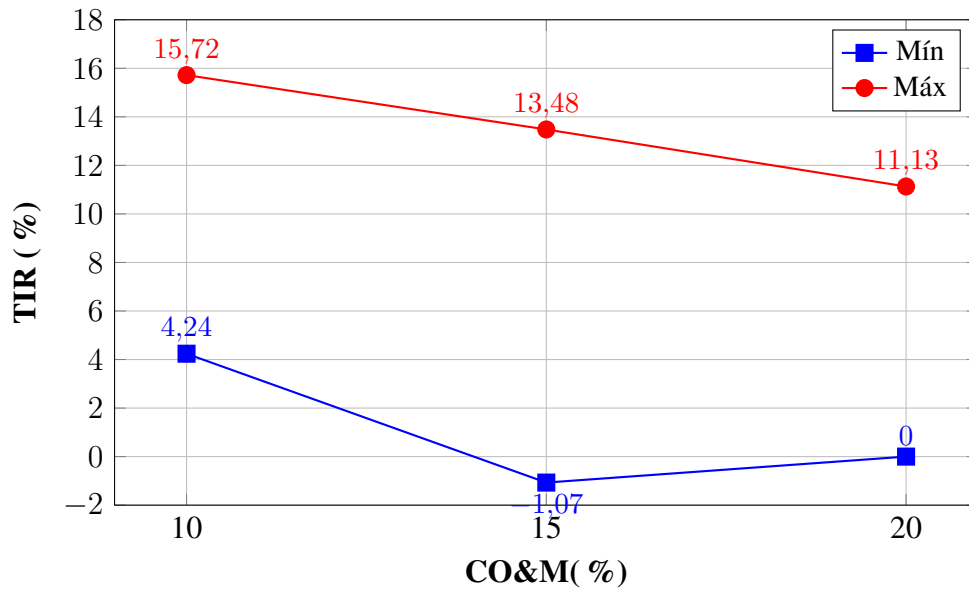
realizó un análisis de sensibilidad considerando el rango reportado en la literatura, correspondiente al 10-20 % de la inversión inicial. En consecuencia, el CO&M fue evaluado específicamente para tres escenarios: 10 %, 15 % y 20 %. las condiciones establecidas en el escenario 1, se replicarán en todos los escenarios.

El escenario 2 incorpora las mismas consideraciones establecidas en el escenario 1, incluyendo un ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado, con el objetivo de evaluar su impacto en la rentabilidad del sistema. Para llevar a cabo esta evaluación, se calculó el biometano generado en los tres escenarios considerados: en el escenario 1, que contempla la producción de metano a partir del nejayote; en el escenario 2, que evalúa la Co-DA entre las empresas involucradas; y en el escenario 3, que analiza Co-DA de una mezcla de 75:25 de nejayote y bagazo de cerveza. En todos los casos, se realizó la conversión del biometano obtenido a GLP, utilizando el poder calorífico de ambos combustibles. Posteriormente, la cantidad de biometano convertida a GLP fue multiplicada por el costo del GLP por litro, y este valor fue integrado en el análisis económico para los distintos casos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios analizados.



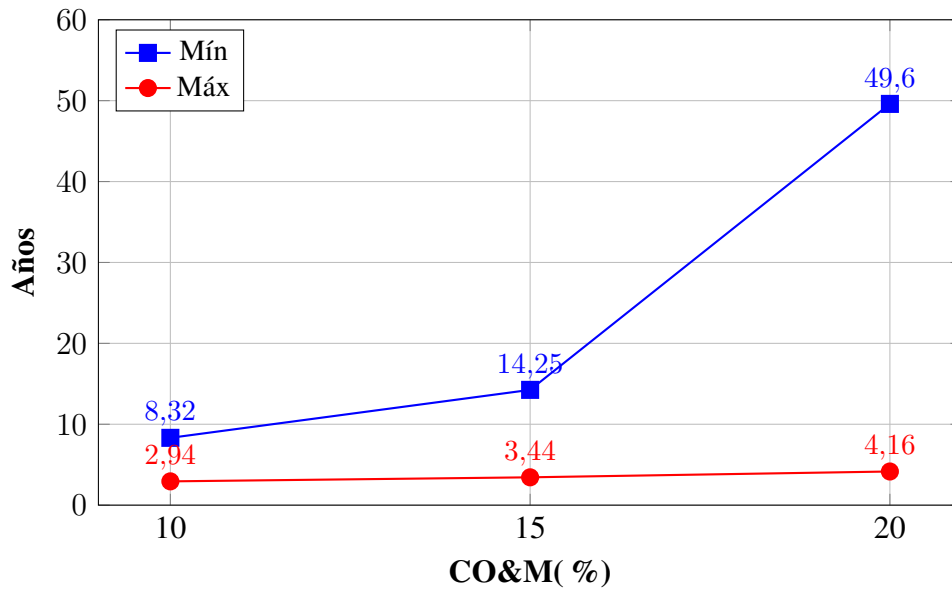
Gráfica 3.19: VAN de todos los casos en el escenario 1.

Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %).



Gráfica 3.20: TIR de todos los casos en el escenario 1.

Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %).



Gráfica 3.21: Periodo de recuperación de inversión de todos los casos en el escenario 1.

Nota: Todos los casos son el caso 1 (DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización), caso 2 (Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación), caso 3 (Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción). El escenario 1 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como el mínimo y \$374,000 MXN como el máximo) y porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %).

En el escenario 1, los casos de mínimo gasto de GLP tienen puntos críticos donde dos de los escenarios no son viables. Estos dos escenarios son cuando tenemos un porcentaje de operación y mantenimiento del 15 % y del 20 %. En la Figura 3.19 Se observa que, para los escenarios con tasas de descuento del 10 % y 15 %, el VAN permanece positivo, lo cual indica que el proyecto genera un rendimiento superior al costo del capital o la tasa mínima esperada de retorno, haciéndolo financieramente viable.

En contraste, al aumentar la tasa de descuento al 20 %, el VAN en el escenario mínimo se torna negativo. Este comportamiento refleja que, bajo una mayor exigencia en la rentabilidad del capital invertido, los flujos de caja generados por el proyecto ya no logran cubrir dicha expectativa, comprometiendo su viabilidad económica. Por lo tanto, este escenario no es deseado, ya que representa un umbral donde el proyecto deja de ser rentable en términos financieros, especialmente bajo condiciones más conservadoras o de mayor riesgo en la inversión.

En la Figura 3.20 se observa la Tasa Interna de Retorno (TIR) para los diferentes escenarios. Aunque en la Figura 3.19 se mostró que el VAN con un CO&M del 15 %

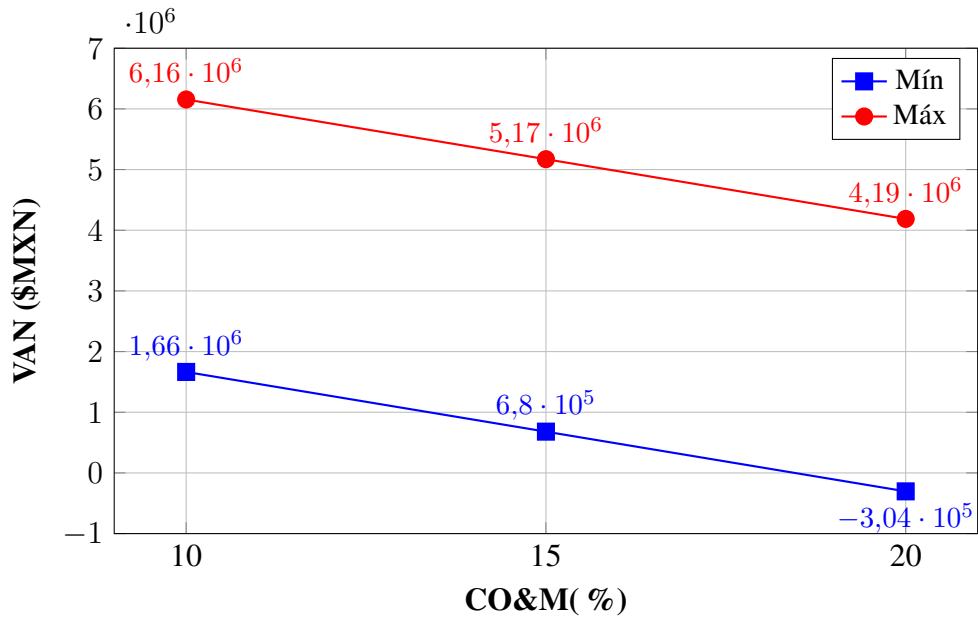
aún es positivo, la TIR en ese mismo escenario es negativa. Esto significa que, aunque se recupere el valor de la inversión, el rendimiento del proyecto es insuficiente frente a la tasa mínima aceptable para que sea rentable. Una TIR negativa indica que el proyecto no genera ganancias reales sobre la inversión inicial, lo que lo vuelve financieramente inviable. Por eso, este escenario no se considera deseable para la implementación del sistema.

En el caso correspondiente a un costo de operación y mantenimiento del 10 %, se obtiene un proceso económicamente viable. Aunque el período de recuperación supera ligeramente los 8 años, el valor actual neto (VAN) es superior a 1.5 millones de pesos y la tasa interna de retorno (TIR) alcanza un 4.24 %.

Para el mismo escenario, todos los casos que consideran el gasto máximo en GLP presentan resultados que indican la viabilidad económica del proyecto. Esto sugiere que la variación en este parámetro no afecta significativamente el resultado del análisis, debido a que los beneficios derivados de la sustitución del GLP superan ampliamente los costos operativos del sistema. En estos casos, el período de recuperación de la inversión varía entre aproximadamente 3 y poco más de 4 años. Asimismo, las tasas internas de retorno (TIR) son positivas, lo que confirma la rentabilidad del proyecto, mientras que los valores actuales netos (VAN) se encuentran en un rango de 3.8 a 5.8 millones de pesos.

## **Resultados del escenario 2**

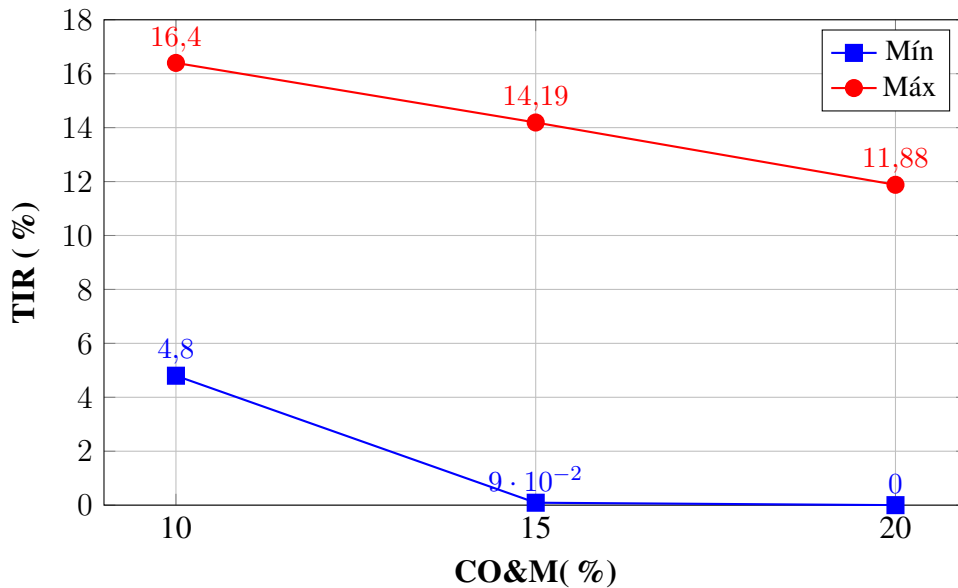
- Caso 1



Gráfica 3.22: VAN del caso 1 en el escenario 2.

Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.22).

La Figura 3.22 muestra la variación del valor actual neto (VAN) del caso 1 en el escenario 2, en función del costo de operación y mantenimiento (CO&M). Se observa un comportamiento similar al identificado en el escenario 1, donde los valores máximos de gasto en GLP generan un VAN más alto en comparación con los valores mínimos, y a medida que aumenta el porcentaje del CO&M, el VAN tiende a disminuir. Sin embargo, en términos generales, el escenario 2 muestra una mayor rentabilidad respecto al escenario 1, debido a la incorporación de ingresos por la venta hipotética del biogás. Este comportamiento se explica por el hecho de que los casos con mayor gasto inicial en GLP obtienen mayores beneficios económicos, ya que el biometano sustituye completamente ese consumo, generando un ahorro anual más significativo. Cabe destacar que, en el caso mínimo con un CO&M del 20 %, el proyecto deja de ser rentable, lo cual resalta la importancia de controlar los costos operativos para mantener la viabilidad financiera del sistema.



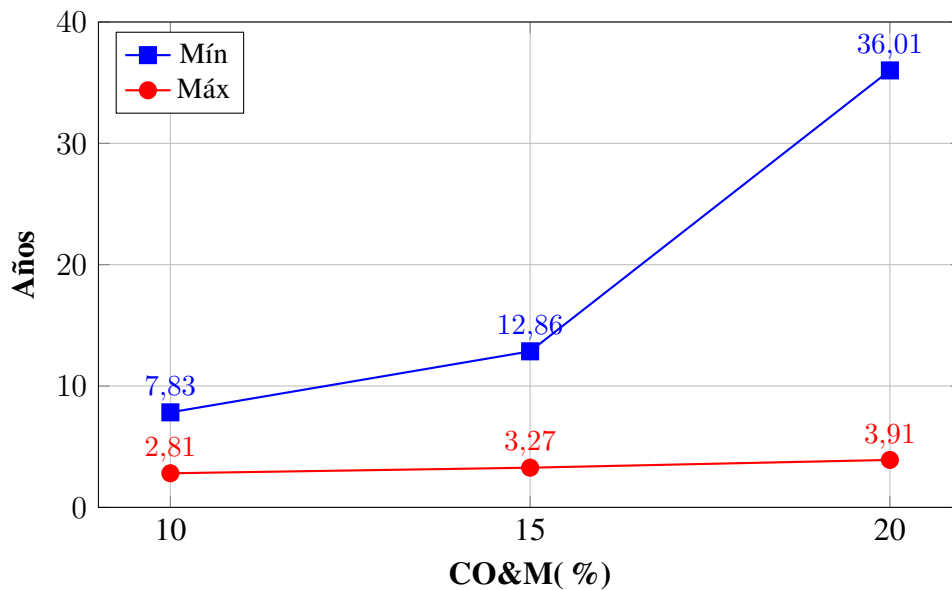
Gráfica 3.23: TIR del caso 1 en el escenario 2.

Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.23).

En la Figura 3.23 confirma lo observado previamente en la Figura 3.22 con respecto al valor actual neto (VAN) en el caso mínimo con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 20 %. Aunque se presenta una tasa interna de retorno (TIR) igual al 0 %, el valor real es negativo, lo que indica que el proyecto no genera beneficios en ese punto.

Para el caso mínimo con un CO&M del 15 %, la TIR es de apenas 0.09 %. Aunque el proyecto sigue siendo técnicamente rentable en este escenario, se encuentra muy cerca del umbral de inviabilidad. Por tanto, es fundamental considerar también el VAN y el período de recuperación de inversión, a fin de evaluar con mayor precisión que tan crítico es este escenario para el proyecto.

Esta situación puede interpretarse como un límite inferior aceptable para la viabilidad económica del proyecto. Al comparar este punto con la TIR correspondiente en el escenario 1, se observa que la diferencia no es significativa; sin embargo, en el escenario 2 aun se mantiene la rentabilidad, lo cual destaca la relevancia del tratamiento de nejayote y la venta del biometano generado como estrategias clave para sostener la viabilidad del sistema.



Gráfica 3.24: Período de recuperación de la inversión del caso 1 en el escenario 2.  
 Nota: El caso 1 es la DA del nejayote generado por la empresa de nixtamalización. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 1 para la Figura 3.24).

En la Gráfica Figura 3.24 se presenta el Retorno sobre la Inversión (ROI) para el Escenario 2 del Caso 1. Se observa que el mejor resultado se obtiene con un CO&M del 10 % en su valor máximo, con un tiempo de recuperación de 2.81 años, lo cual representa una excelente rentabilidad para el proyecto.

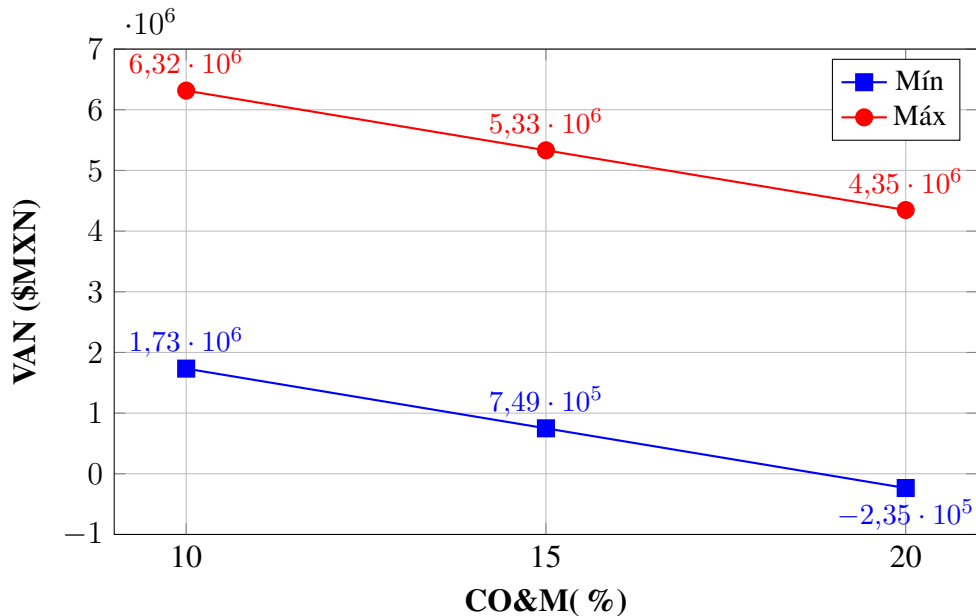
Para los valores mínimos, el ROI varía significativamente con el aumento del CO&M. A 10 % el tiempo de recuperación es de 7.83 años, pero este se extiende a 12.86 años con un CO&M del 15 %, y hasta 36.01 años con un CO&M del 20 %, lo que indica una rentabilidad marginal o incluso no deseable en ese último caso.

En contraste, los valores máximos muestran un comportamiento más estable frente al aumento del CO&M. El tiempo de recuperación varía solo ligeramente: de 2.81 años a 3.91 años entre un CO&M del 10 % y del 20 %.

Comparado con el Escenario 1, este escenario presenta mejoras. Los tiempos de recuperación se reducen en todos los puntos máximos entre 1.5 y 3 meses, y en el caso mínimo con 10 % de CO&M, la reducción es de aproximadamente 6 meses.

En general, el Escenario 2 mantiene una rentabilidad sólida en sus puntos máximos, mientras que en los mínimos se muestra más sensible al incremento en los costos operativos, lo cual debe considerarse en la toma de decisiones.

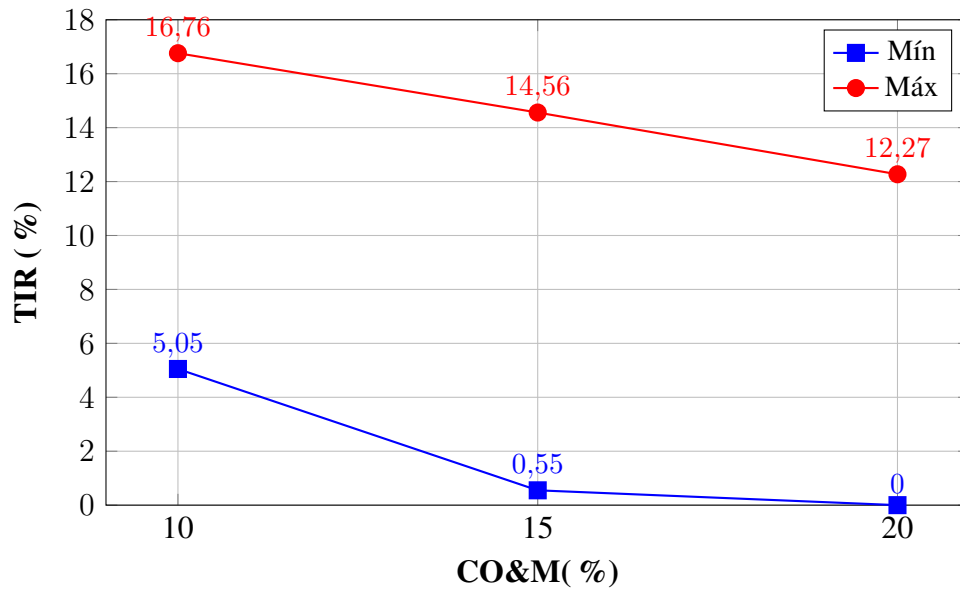
■ Caso 2



Gráfica 3.25: VAN del caso 2 en el escenario 2.

Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.25).

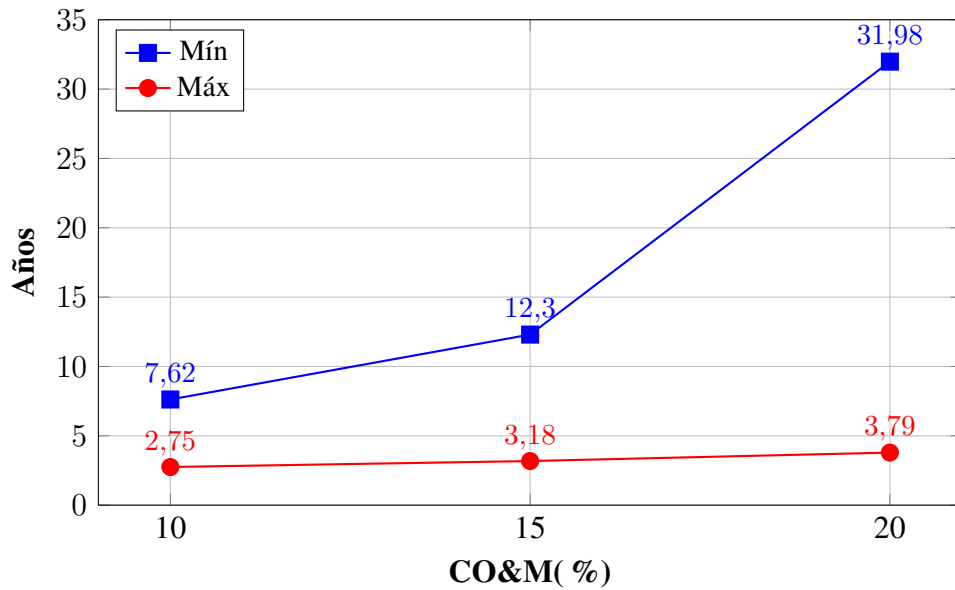
En el análisis del caso dos bajo el escenario dos, la Figura 3.25 confirma que el caso mínimo con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 20 % no resulta rentable. No obstante, en comparación con el escenario 1, se observa un incremento en los beneficios económicos, atribuible a los ingresos hipotéticos por la venta del biometano generado. Este comportamiento se mantiene en el presente caso, particularmente por la incorporación de un segundo residuo, el bagazo de cerveza, que contribuye a una mayor producción de biometano. Como resultado, se incrementa el volumen disponible para la venta, lo que se traduce en una mejora en la rentabilidad del proyecto.



Gráfica 3.26: TIR del caso 2 en el escenario 2.

Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.26).

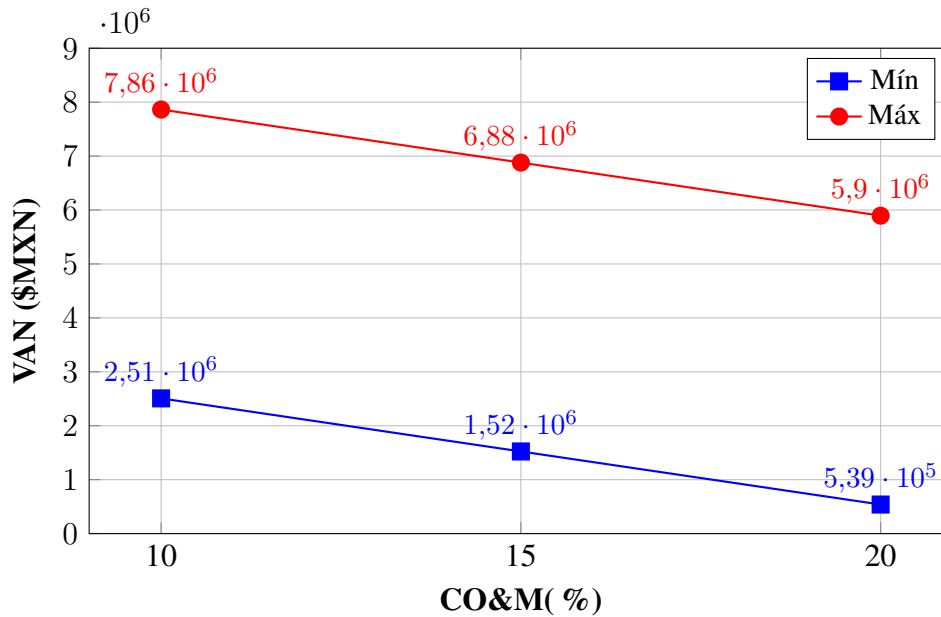
La Figura 3.26 también muestra este aumento en la TIR, aunque nos muestra unas rentabilidades similares a las del caso 1. El mínimo con CO&M de 20 % se mantendría sin rentabilidad, y el caso de mínimo de CO&M en 15 % anteriormente analizado para el caso 1, tiene un aumento, pero su rentabilidad sigue en el límite, mostrando que, para un caso hipotético de venta de biometano, este escenario seguiría siendo crítico. A pesar de ello, así como no hay gran diferencia entre el escenario mínimo de la TIR con un CO&M en 15 y 20 %, tampoco se visualiza una gran diferencia con los los escenarios del mínimo en 10 % y los máximos, por lo que, la mayoría de los escenarios seguirían siendo rentables.



Gráfica 3.27: Período de recuperación de la inversión del caso 2 en el escenario 2.  
 Nota: El caso 2 es la Co-DA del nejayote y bagazo de cerveza generados por las empresas involucradas en la investigación. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 2 para la Figura 3.27).

Al comparar la Figura 3.27 con la Figura 3.23, correspondientes a los periodos de recuperación de la inversión para los casos 1 y 2, se observa una tendencia general similar entre ambos. No obstante, se identifican diferencias relevantes, particularmente en los escenarios mínimos del caso 2, los cuales muestran mejoras significativas en comparación con el caso 1. Aunque los periodos de recuperación en los escenarios máximos no presentan variaciones sustanciales entre ambos casos, en el caso mínimo con un CO&M del 15 %, se registra una reducción de aproximadamente 7 meses en el período de recuperación, lo que incrementa la rentabilidad del proyecto respecto al escenario equivalente en el caso 1. Asimismo, en el caso mínimo con CO&M del 10 %, el periodo de recuperación se reduce a 7.62 años, lo que representa únicamente el 30 % del ciclo de vida estimado del sistema, reforzando su viabilidad económica.

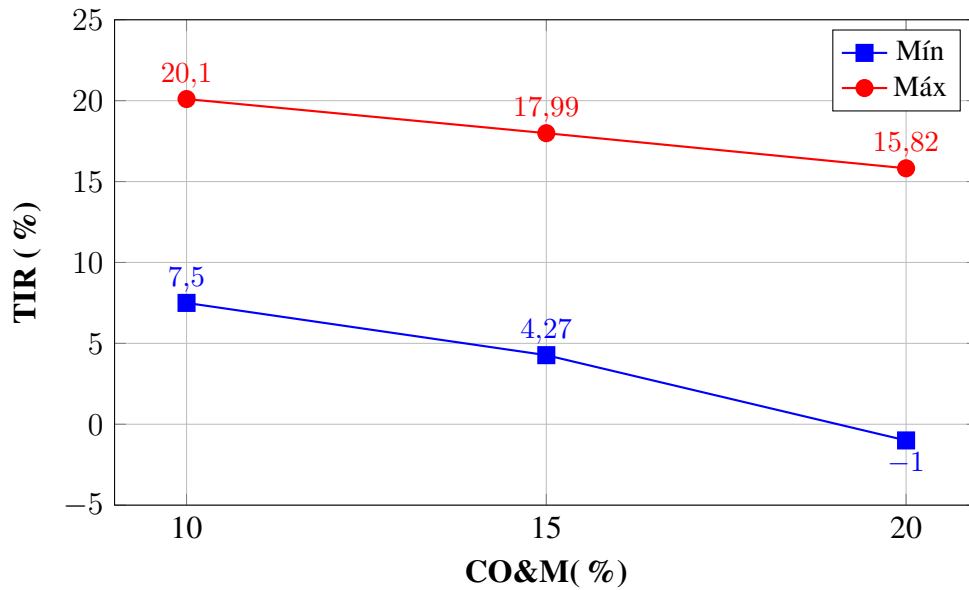
- Caso 3



Gráfica 3.28: VAN del caso 3 en el escenario 2.

Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.28).

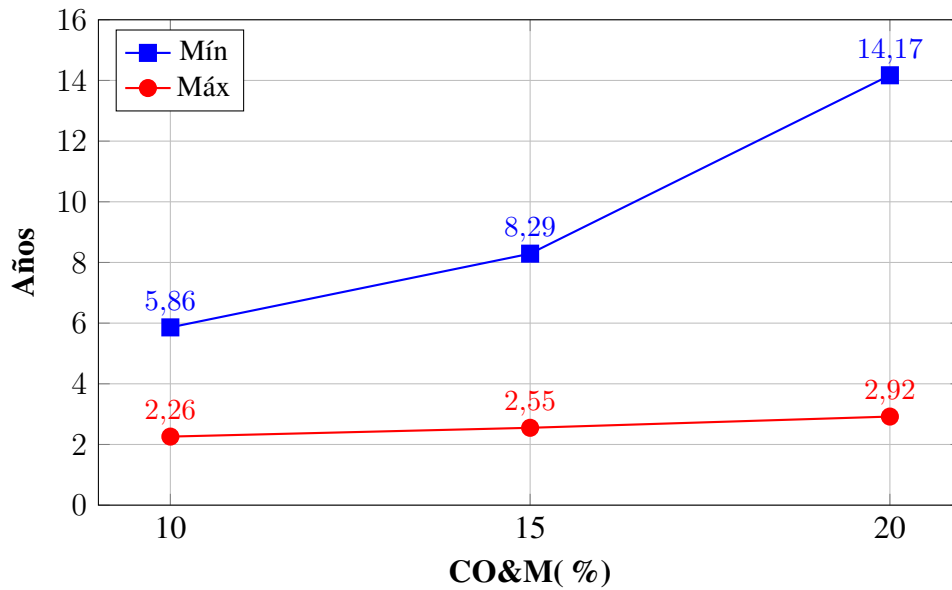
La Figura 3.28 muestra que es hasta el caso tres cuando se alcanza la rentabilidad en todos los escenarios evaluados de acuerdo con el valor actual neto (VAN). En particular, el escenario mínimo con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 20 % presenta un VAN positivo de aproximadamente 540 mil pesos. Es importante destacar que este análisis asume que tanto el CO&M (fijado en 20 %) como los gastos asociados al consumo de GLP se mantienen constantes en sus valores mínimos. Dado que estos costos no disminuirían en condiciones reales y, en caso de modificarse, tenderían a incrementarse, el proyecto muestra cierta vulnerabilidad en este punto. Sin embargo, considerando las dinámicas operativas típicas de los sistemas de nixtamalización, alcanzar condiciones tan críticas resulta poco probable. Por lo tanto, se espera que los niveles de consumo de GLP se mantengan más cercanos a valores intermedios dentro del rango estimado (entre \$187,200 y \$374,400 MXN), lo que favorece la estabilidad económica del proyecto.



Gráfica 3.29: TIR del caso 3 en el escenario 2.

Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.29).

La Figura 3.29 presenta los valores de la tasa interna de retorno (TIR) para caso 3 en el escenario 2, evidenciando un incremento en la rentabilidad del proyecto en comparación con los casos anteriores. Si bien el escenario mínimo con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 20 % continúa siendo no rentable, el caso con CO&M del 15 %, muestra una mejora significativa en la TIR, lo que indica una mayor efectividad económica en este punto respecto a los escenarios previamente analizados.



Gráfica 3.30: Período de recuperación de la inversión del caso 3 en el escenario 2.

Nota: El caso 3 es la Co-DA a partir de la proporción de 75:25 (nejayote:bagazo de cerveza) considerando la generación de nejayote de la empresa de nixtamalización y el volumen de bagazo de cerveza requerido para la proporción. El escenario 2 considera la reducción del costo por uso de GLP (\$187,200 MXN como mínimo y \$374,000 MXN como máximo), porcentajes de CO&M (10 %, 15 % y 20 %) y el ingreso estimado por la venta teórica del biogás generado a partir del caso de estudio (caso 3 para la Figura 3.30).

Para el caso 3, la Figura 3.30 muestra una mejora en los periodos de recuperación de la inversión, particularmente en los escenarios mínimos. En comparación con el caso anterior, el el escenario con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 15 % muestra una reducción de cuatro años en el período de recuperación, situándolo en 8.29 años. Este resultado confirma una rentabilidad significativamente mayor respecto a los casos 1 y 2 bajo el mismo escenario.

Tabla 3.13: Evaluación del VAN para los diferentes casos y escenarios estudiados.

| Casos  | Escenarios  | Consideraciones | 10 %           |                | 15 %           |                | 20 %          |                |
|--------|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
|        |             |                 | Mín            | Máx            | Mín            | Máx            | Mín           | Máx            |
| Caso 1 | Escenario 1 | GLPReduc        | \$1,514,784.02 | \$5,848,117.35 | \$530,653.67   | \$4,863,987.01 | -\$453,476.68 | \$3,879,856.66 |
|        | Escenario 2 | GLPReduc, V.E.T | \$1,664,538.06 | \$6,155,178.61 | \$680,407.71   | \$5,171,048.27 | -\$303,722.64 | \$4,186,917.92 |
| Caso 2 | Escenario 2 | GLPReduc, V.E.T | \$1,733,494.35 | \$6,315,624.52 | \$749,364.00   | \$5,331,494.18 | -\$234,766.35 | \$4,347,363.83 |
| Caso 3 | Escenario 2 | GLPReduc, V.E.T | \$2,507,369.43 | \$7,863,374.69 | \$1,523,239.08 | \$6,879,244.34 | \$539,108.73  | \$5,895,113.99 |

Tabla 3.14: TIR para los diferentes casos y escenarios estudiados.

| Casos  | Escenarios  | Consideraciones       | 10 %   |         | 15 %    |         | 20 %    |         |
|--------|-------------|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |             |                       | Mín    | Máx     | Mín     | Máx     | Mín     | Máx     |
| Caso 1 | Escenario 1 | • GLPReduc            | 4.24 % | 15.72 % | -1.07 % | 13.48 % | <0      | 11.13 % |
|        | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 4.80 % | 16.40 % | 0.09 %  | 14.19 % | <0      | 11.88 % |
| Caso 2 | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 5.05 % | 16.76 % | 0.55 %  | 14.56 % | <0      | 12.27 % |
| Caso 3 | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 7.50 % | 20.10 % | 4.27 %  | 17.99 % | -1.00 % | 15.82 % |

Tabla 3.15: Período de recuperación para todos los casos y escenarios estudiados.

| Casos  | Escenarios  | Consideraciones       | 10 % |      | 15 %  |      | 20 %  |      |
|--------|-------------|-----------------------|------|------|-------|------|-------|------|
|        |             |                       | Mín  | Máx  | Mín   | Máx  | Mín   | Máx  |
| Caso 1 | Escenario 1 | • GLPReduc            | 8.32 | 2.94 | 14.25 | 3.44 | 49.60 | 4.16 |
|        | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 7.83 | 2.81 | 12.86 | 3.27 | 36.01 | 3.91 |
| Caso 2 | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 7.62 | 2.75 | 12.30 | 3.18 | 31.98 | 3.79 |
| Caso 3 | Escenario 2 | • GLPReduc<br>• V.E.T | 5.86 | 2.26 | 8.29  | 2.55 | 14.17 | 2.92 |

Las Tablas 3.13, 3.14, 3.15 presentan los valores del valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y los períodos de recuperación de la inversión correspondientes a todos los casos y escenarios analizados. En términos generales, se observa que en todos los escenarios máximos, independientemente del costo de operación y mantenimiento (CO&M), los proyectos resultan rentables. En contraste, los escenarios mínimos muestran puntos críticos, particularmente aquellos con un CO&M del 20 %, donde los proyectos no alcanzan la rentabilidad. Al reducir el CO&M al 15 %, se identifica que solo uno de los escenarios mínimos permanece no rentable, mientras que dos se sitúan en el umbral de viabilidad. En este contexto, el caso 3 considerado el más favorable alcanza una rentabilidad intermedia, posicionándose entre los escenarios claramente rentables y aquellos que se encuentran en el límite de variabilidad.

Los escenarios mínimos con un costo de operación y mantenimiento (CO&M) del 10 % resultan rentables para el proyecto. El período de recuperación más alto en este caso es de 8.32 años, lo que representa un poco más del 30 % del ciclo de vida estimado

del sistema. El caso óptimo dentro de este escenario corresponde al caso 3, donde gracias a los ingresos derivados de la venta de biometano generado a partir del tratamiento de nejayote y bagazo de cerveza en un sistema de codigestión anaerobia (Co-DA) ideal, el período de recuperación se reduce a 5.86 años.

Considerando el total de combinaciones analizadas entre casos y escenarios, se identificaron 13 escenarios óptimos, 4 escenarios permisibles, 2 escenarios críticos y 5 escenarios no rentables. Estos resultados reflejan que el tratamiento de los residuos orgánicos mediante Co-DA no solo es técnica y ambientalmente viable, sino también económicamente factible en la mayoría de los escenarios evaluados. La alta proporción de escenarios óptimos y permisibles frente a los críticos o no rentables evidencia el potencial de esta alternativa como solución sostenible para el manejo de residuos agroindustriales, contribuyendo tanto a la generación de energía renovable como a la mitigación del impacto ambiental.

# Capítulo 4

## Conclusiones

El presente estudio se enfocó en evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del tratamiento conjunto de nejayote y bagazo de cerveza mediante codigestión anaerobia (Co-DA), con fines energéticos, en el contexto del proceso de nixtamalización. Para ello, se llevó a cabo un análisis integral que combinó una revisión bibliográfica con la caracterización fisicoquímica experimental de los residuos generados por las empresas involucradas. Esta metodología permitió estimar con mayor precisión el potencial de generación de metano y justificar el uso de valores teóricos comparables, aplicables a los residuos específicos del caso de estudio. A partir de estos datos, se diseñaron y evaluaron escenarios representativos que permitieron establecer comparaciones tecnoeconómicas y ambientales entre el sistema convencional y las alternativas basadas en digestión anaerobia.

Los resultados obtenidos evidenciaron que tanto la digestión anaerobia del nejayote como su codigestión con bagazo de cerveza constituyen alternativas viables para sustituir el uso de gas licuado de petróleo (GLP) en el proceso de nixtamalización. Destaca especialmente la codigestión con una proporción 75:25 de nejayote:bagazo de cerveza, identificada como el escenario óptimo por su alta sinergia en la producción de biometano. No obstante, se demostró que incluso el tratamiento exclusivo del nejayote presenta un potencial energético suficiente para cubrir completamente la demanda térmica del proceso, con un posible excedente útil en otras aplicaciones. Aun bajo escenarios en los que no se contempla la venta del biometano, el análisis de viabilidad reveló que el 66 % de las combinaciones evaluadas resultan positivas, frente a un 33 % que no lo son.

Este margen de escenarios no rentables está relacionado principalmente con los resultados del análisis de sensibilidad, el cual identificó que el aumento de los costos de operación y mantenimiento (CO&M), junto con la variabilidad en el precio del combustible, pueden afectar significativamente la rentabilidad del sistema. Particularmente, cuando los costos

operativos se sitúan en su valor máximo estimado, algunos escenarios pierden viabilidad económica. Sin embargo, se prevé que en una implementación a escala piloto, dichos costos no presenten fluctuaciones tan acentuadas como las planteadas en el análisis de sensibilidad, lo que contribuiría a una mayor estabilidad del sistema en condiciones reales.

Entre las principales contribuciones del estudio se encuentra la propuesta de una combinación de residuos nejayote y bagazo de cerveza que, hasta donde se ha documentado en la literatura, no había sido previamente evaluada para fines de codigestión anaerobia. Los resultados obtenidos demuestran no solo la factibilidad ambiental y energética de este sistema, sino también su potencial económico, lo que convierte a esta alternativa en una propuesta innovadora y replicable en contextos similares. Además, se aporta un marco metodológico que puede ser aplicado a otros residuos agroindustriales, combinando caracterización experimental, análisis técnico-económico y escenarios proyectivos reales.

Como parte de las futuras líneas de investigación, se recomienda profundizar en estudios experimentales que utilicen residuos reales bajo condiciones controladas, a fin de determinar el rendimiento específico de generación de metano y el contenido energético del biogás. Esta etapa es clave para reducir la dependencia de valores teóricos y validar la operatividad del sistema. Asimismo, resulta necesario realizar un análisis anual detallado del consumo energético de las empresas nixtamaleras, diferenciando sus procesos térmicos, con el objetivo de identificar oportunidades de eficiencia, sustitución parcial o total del GLP, y cuantificación de beneficios económicos asociados.

Otras áreas de interés incluyen el aprovechamiento térmico del nejayote, que debido a su elevada temperatura tras el proceso de cocción, podría beneficiarse de un pretratamiento térmico antes de su ingreso al sistema de Co-DA. Además, se sugiere evaluar el impacto de operar en condiciones mesofílicas frente a termofílicas, así como explorar el potencial de reutilización del agua tratada en el propio proceso de codigestión. Finalmente, se plantea la posibilidad de integrar la conversión del biometano a energía eléctrica o su comercialización, con lo cual se podrían maximizar los beneficios económicos y ampliar las oportunidades de aplicación práctica del sistema propuesto.

# Bibliografía

- Abdelrahman, A. M., Tabar, S. A., Cicekalan, B., Basa, S., Ucas, G., Guven, H., Ozgun, H., Ozturk, I., Koyuncu, I., van Lier, J. B., Volcke, E. I., & Ersahin, M. E. (2025). Mesophilic versus thermophilic digestion of sludge in anaerobic membrane bioreactors. *Bioresource Technology*, 417, 131822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131822>
- Acosta Estrada, B. A., Gutiérrez Uribe, J. A., Lazo Vélez, M. A., & Serna Saldívar, S. R. O. (2020, 29 de octubre). *PRODUCTOS ALIMENTICIOS ADICIONADOS CON FIBRA DIETARIA, COMPUESTOS FENOLICOS Y CALCIO OBTENIDOS DE SÓLIDOS DE NEJAYOTE* (MX/a/2014/008049).
- Arriaga González, I. (2021, enero). *Evaluación del efecto anticancerígeno y antiinflamatorio de los ácidos fenólicos presentes en nejayote derivado del maíz variedad Bolita* [Maestría]. Instituto Politécnico Nacional.
- Asaff Torres, A., Alejo Castillo, M. L., & Gonzalez Perez, A. (2012, 12 de octubre). *COMPOSICIONES FITOCEUTICAS PARA MASCOTAS* (MX/a/2009/008889).
- Asaff Torres, A., & Reyes Vidal, M. Y. (2019, 25 de octubre). *UN MÉTODO Y UN SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DEL MAÍZ* (MX/a/2013/002096).
- Balbinoti, J. R., dos Santos Junior, R. E., de Sousa, L. B. F., de Jesus Bassetti, F., Balbinoti, T. C. V., de Matos Jorge, L. M., & Jorge, R. M. M. (2023). Plant-based coagulants for food industry wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103525. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103525>
- Bi, S., Guo, L., Wang, H., Yu, X., Wei, F., Lei, L., Zhao, C., & Wang, Y. (2025). Performance of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of food waste at varying organic loading rate: Methane production, pathogens reduction, and dominant microbial community dynamics. *Renewable Energy*, 239, 122094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122094>
- Bi, S., Wang, C., Wang, H., Du, Y., Yu, X., & Wang, Y. (2024). Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of food waste: Focusing on methanogenic performance and pathogens removal. *Renewable Energy*, 233, 121184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121184>

- Boshagh, F., van Niel, E., & Lee, C.-J. (2025). Techno-economic and life-cycle analyses of dark fermentative hydrogen production integrated with anaerobic digestion from coffee-manufacturing wastewater under thermophilic and mesophilic conditions. *Bioresource Technology*, *416*, 131737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131737>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.014>
- Buitimea-Cantúa, N. E., Antunes-Ricardo, M., Gutiérrez-Urbe, 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/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109881>
- Caliskan, G., Giray, G., Keskin Gundogdu, T., & 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. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*.
- Camarena Martínez, P., Tututi Ávila, S., Martínez Ávila, G., Márquez Reyes, J., Valderrama, S. R., & Medina Herrera, N. (2024). DESARROLLO DE UN SOFT SENSOR PARA LA PREDICCIÓN DEL PH EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. *La Academia Mexicana de Investigación Docencia en Ingeniería Química A. C.*
- Campello, L., Barros, R., Filho, G., & Santos, I. (2021). Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, *23*. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00689-y>
- Castells, X. (2012). *Biomasa y Bionergía: Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Editorial Díaz de Santos, S.A. <https://books.google.com.mx/books?id=zMxp3A1LBO8C>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100039>
- Castro-Muñoz, R., Fila, V., & Duran-Paramo, E. (2019). A Review of the Primary By-product (Nejayote) of the Nixtamalization During Maize Processing: Potential

- Reuses. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0029-4>
- Cerveceros de México. (2022). *Producción de Cerveza en México 2010-2021*. <https://cervecerosdemexico.com/revistas/produccion.pdf>
- Cheng, S., Lohani, S. P., Rajbhandari, U. S., Shrestha, P., Shrees, S., Bhandari, R., & Jeuland, M. (2024). Sustainability of large-scale commercial biogas plants in Nepal. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139777>
- Chertow, M. R. (2000). INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy. *Annual Review of Environment and Resources*, 25(Volume 25, 2000), 313-337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- CONAGUA. (2020, junio). *Indicadores de calidad del agua*. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/approot/dgeia\\_mce/html/RECUADROS\\_INT\\_GLOS/D3\\_AGUA/D3\\_AGUA04/D3\\_R\\_AGUA05\\_01.htm](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm).
- 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/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.208>
- del M. Chaile, A. P., Uboldi, M. E., & Elsa Ferreyra, M. M. (2024). Tratamiento químico de vinaza de caña de azúcar con peróxido de hidrógeno. *Revista de Ciencias Ambientales*, 59(1), 1-19. <https://doi.org/10.15359/rca.59-1.5>
- Diaz Huerta, J., Bose, A., Wall, D. M., Murphy, J. D., & O'Shea, R. (2023). Assessing the cost variability of emissions abatement in small-scale on-farm anaerobic digestion. *DeCarbon*, 1, 100008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.decarb.2023.100008>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.062>
- Edwards, J., Othman, M., & Burn, S. (2015). A review of policy drivers and barriers for the use of anaerobic digestion in Europe, the United States and Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 815-828. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.112>
- Ehtisham, M., Saeed-Ul-Hassan, M., & Poater, A. (2025). A comprehensive review of approaches, systems, and materials used in adsorption-based atmospheric water

- harvesting. *Science of The Total Environment*, 958, 177885. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177885>
- El Ibrahimy, M., Khay, I., El Maakoul, A., & Bakhouya, M. (2021). Techno-economic and environmental assessment of anaerobic co-digestion plants under different energy scenarios: A case study in Morocco. *Energy Conversion and Management*, 245, 114553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114553>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>
- ENRES. (2019). *Guía práctica de desulfuración biológica de biogás*. [https://energypedia.info/images/5/58/Guia\\_practica\\_desulfuracion-biologica\\_biogas.pdf](https://energypedia.info/images/5/58/Guia_practica_desulfuracion-biologica_biogas.pdf)
- EPA. (2024, agosto). *Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero>
- España-Gamboa, E., Maldonado, J., Tapia-Tussell, R., Chale-Canul, J., & Alzate-Gaviria, L. (2018). Corn industrial wastewater (nejayote): a promising substrate in Mexico for methane production in a coupled system (APCR-UASB). *Environmental Science and Pollution Research*, 25. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0479-z>
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Fernández, J. (2003). *Energía de la Biomasa*.
- 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>
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramirez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO<sub>2</sub>. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13, 517-525.
- Fraume, N. J. (2006). *Diccionario ambiental*. Ecoe Ediciones.
- Fuess, L. T., Klein, B. C., Chagas, M. F., Alves Ferreira Rezende, M. C., Garcia, M. L., Bonomi, A., & Zaiat, M. (2018). Diversifying the technological strategies for recovering bioenergy from the two-phase anaerobic digestion of sugarcane vinasse: An integrated techno-economic and environmental approach. *Renewable Energy*, 122, 674-687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.003>
- Galvis, J. (2016). Residuos sólidos: problema, conceptos, básico y algunas estrategias de solución. *II*, 101-119.

- García-Depraect, 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/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.204>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.10.012>
- Gitman, L. J. (2007). *Principios de administración financiera* (11.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.
- Global Alliance for Incinerator Alternatives. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y alto costo [Consultado el 31 de marzo de 2025]. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP-1.pdf>
- Heredia Salgado, M. A., Coba S, J. A., & Tarelho, L. A. (2020). Simultaneous production of biochar and thermal energy using palm oil residual biomass as feedstock in an auto-thermal prototype reactor. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121804. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121804>
- Huiru, Z., Yunjun, Y., Liberti, F., Pietro, B., & Fantozzi, F. (2019). Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste. *Energy Conversion and Management*, 180, 938-948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.045>
- Ibarra-Esparza, F. E., González-López, M. E., Ibarra-Esparza, J., Lara-Topete, G. O., Senés-Guerrero, C., Cansdale, A., Forrester, S., Chong, J. P., & Gradilla-Hernández, M. S. (2023). Implementation of anaerobic digestion for valorizing the organic fraction of municipal solid waste in developing countries: Technical insights from a systematic review. *Journal of Environmental Management*, 347, 118993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118993>
- Igoni, A., Abowei, M., Ayotamuno, M., & Chibuogwu, E. (2008). Effect of total solids concentration of municipal solid waste on the biogas produced in an anaerobic continuous digester. *Agricultural Engineering International, the CIGRE J. X*, 7-10.
- INEGI. (2020). *Colección de estudios sectoriales y regionales Conociendo la Industria de la cerveza*. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198428.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf)

- INVENT Umwelt- und Verfahrenstechnik AG. (2024). Digestión aerobia [Consultado el 26 de enero de 2024]. <https://invent-uv.com/wp-content/uploads/sites/23/2024/01/Digestion-aerobia.pdf>
- IPCC. (2007). *Gases de efecto invernadero*. [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html)
- Kasaeian, A., Afshari, F., Mahmoudkhani, M., Masoumi, A., & Esmaeili Bidhendi, M. (2025). Waste heat recovery by thermodynamic cycles in cement plants: A review. *Energy*, 314, 134087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134087>
- Kim, G.-B., Cayetano, R. D. A., Park, J., Jo, Y., Jeong, S. Y., Lee, M. Y., Pandey, A., & Kim, S.-H. (2022). Impact of thermal pretreatment on anaerobic digestion of dewatered sludge from municipal and industrial wastewaters and its economic feasibility. *Energy*, 254, 124345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124345>
- Laines Canepa, J. A., José Ramón Sosa Olivier. (2013). Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. *Ingeniería*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46729718005>
- Lavoisier, A. (1789). *Traité Élémentaire de Chimie*. Cuchet.
- Li, J., Luo, G., He, L., Xu, J., & Lyu, J. (2017). Analytical Approaches for Determining Chemical Oxygen Demand in Water Bodies: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48. <https://doi.org/10.1080/10408347.2017.1370670>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117685>
- Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2018). Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 151-167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>
- LIPA. (2020). *Introducción a la elaboración de cerveza artesanal*. <https://lipa.agro.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/sites/29/2020/03/GUIA-CERVEZA.pdf>
- López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M., & 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/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.278>

- Luo, L., Lu, L., Shen, X., Chen, J., Pan, Y., Wang, Y., & Luo, Q. (2023). Energy, exergy and economic analysis of an integrated ground source heat pump and anaerobic digestion system for Co-generation of heating, cooling and biogas. *Energy*, 282, 128220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128220>
- Mainardis, M., Hickey, M., & Dereli, R. K. (2024). Lifting craft breweries sustainability through spent grain valorisation and renewable energy integration: A critical review in the circular economy framework. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141527>
- Maldonado, Y., Alonso-Lemus, I., Sarabia-Castillo, C., Escobar-Morales, B., Ríos-González, L., Fernández-Luqueño, F., & Rodríguez-Varela, F. (2025). Sewage sludge-derived biocarbons as catalysts of bioanodes in a dual-chamber microbial fuel cell using nejayote as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 108, 185-197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.460>
- Mass, K., & Medrano, Y. (2013). Tratamiento de aguas residuales a partir de digestión anaerobia. *Programa de Ingeniería Química*, 5(2), 1-17.
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7)
- Méndez-Albores, J., Arámbula-Villa, G., Loarca-Piña, M., González-Hernández, J., Castaño-Tostado, E., & Moreno-Martínez, E. (2004). Aflatoxins' fate during the nixtamalization of contaminated maize by two tortilla-making processes. *Journal of Stored Products Research*, 40(1), 87-94. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(02\)00080-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-474X(02)00080-2)
- Meneses, N. G., Martins, S., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2013). Influence of extraction solvents on the recovery of antioxidant phenolic compounds from brewer's spent grains. *Separation and Purification Technology*, 108, 152-158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.015>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.026>
- Musluoğlu, A., Dereli, R. K., Arıkan, O. A., Guven, H., & Maçın, K. E. (2025). Techno-economic assessment of digestate management for full-scale continuous dry anaerobic digestion plant. *Bioresource Technology*, 420, 132131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132131>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.046>
- Nabaterega, R., Kumar, V., Khoei, S., & Eskicioglu, C. (2021). A review on two-stage anaerobic digestion options for optimizing municipal wastewater sludge treatment process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4), 105502. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105502>
- 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>
- Nirmal, N., Mahale, K. R., Rathod, N. B., Siddiqui, S. A., & Dhar, B. K. (2025). Winery waste: A sustainable approach for bioactive compound extraction and various industrial applications. *Process Safety and Environmental Protection*, *193*, 760-771. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.106>
- Nogués, F. S., García-Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)* (Vol. 173). Universidad de Zaragoza.
- Obotey Ezugbe, E., & Rathilal, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes*, *10*(5). <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/5/89>
- O'Connor, S., Ehimen, E., Pillai, S. C., Lyons, G., Johnston, C., Wills, M., & Bartlett, J. (2023). Decision support tool for the construction and seasonal operation of farm-scale anaerobic digestion plants. *Results in Engineering*, *18*, 101097. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101097>
- Paramaguru, G., Kannan, M., Lawrence, P., & Thamilselvan, D. (2017). Effect of total solids on biogas production through anaerobic digestion of food waste. *Desalination and Water Treatment*, *63*, 63-68. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20167>
- Park, J., Kwon, Y., Kim, G.-B., Jo, Y., Park, S., Hye Yoon, Y., Park, K., & Kim, S.-H. (2025). Enhanced performance and economic feasibility of sewage sludge digestion using a two-stage anaerobic digestion with a dynamic membrane and alkaline-thermal pretreatment. *Bioresource Technology*, *415*, 131661. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131661>
- Parra, B., Torres Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L., Cardenas Cleves, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordonez, J. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal / Influence of pH on anaerobic digestion

- of municipal bio-wastes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica - 0123-4226*, 17, 553-562. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.421>
- 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>
- Pinto, J. A., Barros, R. M., dos Santos, I. F. S., Filho, G. L. T., de Oliveira Botán, M. C., Bôas, T. F. V., & de Cássia Crispim, A. M. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. *Cleaner Waste Systems*, 5, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>
- Pinzon, A. (2009). La Simbiosis Industrial en Kalundborg, Dinamarca. *DEARQ : Journal of Architecture*. <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.19>
- Purwanta, Bayu, A. I., Mellyanawaty, M., Budiman, A., & Budhijanto, W. (2022). Techno-economic analysis of reactor types and biogas utilization schemes in thermophilic anaerobic digestion of sugarcane vinasse. *Renewable Energy*, 201, 864-875. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.087>
- Qiu, W., Li, Y., Xue, Y., & Wu, H. (2024). Industrial substitution symbiosis and technological innovation under carbon neutrality: Evidence from resource-based industries in China. *Environmental Technology & Innovation*, 36, 103895. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103895>
- Rahmani, A. M., Hafyan, R. H., Tyagi, V. K., Gadkari, S., Kazmi, A., & Ojha, C. S. P. (2025). Advanced anaerobic co-digestion of hydrothermally pretreated wheat straw: Process performance, techno-economic and life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 373, 123559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123559>
- Ramin, E., Faria, L., Gargalo, C. L., Ramin, P., Flores-Alsina, X., Andersen, M. M., & Gernaey, K. V. (2024). Water innovation in industrial symbiosis - A global review. *Journal of Environmental Management*, 349, 119578. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119578>
- Ramirez, A., & Castro-Muñoz, R. (2020). Emerging techniques assisting nixtamalization products and by-products processing: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798352>
- Ramírez Araujo, H. (2019, 10 de abril). *Extensión de la vida de anaquel de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizada obtenida por calentamiento óhmico utilizando conservadores* [Maestría]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Reinold, M. R. (1997). *Manual Práctico de Cervejaria*.

- Ribau Teixeira, M., Guarda, E. C., Freitas, E. B., Galinha, C. F., Duque, A. F., & Reis, M. A. (2020). Valorization of raw brewers' spent grain through the production of volatile fatty acids. *New Biotechnology*, 57, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.01.007>
- Riva, C., Schievano, A., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2014). Production costs and operative margins in electric energy generation from biogas. Full-scale case studies in Italy. *Waste Management*, 34(8), 1429-1435. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.018>
- Rivero Martínez, D. E. P., Almazán Ruiz, F. J., Vidal Caballero, F., González Martínez, I., Ambríz García, J. J., Ramírez Romero, M. A. G., Cruz Díaz, M. R., & Torres Mendoza, Á. (2020, 20 de marzo). *Proceso para el tratamiento del nejayote por electrocoagulación (MX/a/2013/008235)*.
- Rojas-García, C., García-Lara, S., Serna-Saldivar, S., & Gutiérrez-Urbe, J. (2012). Chemopreventive Effects of Free and Bound Phenolics Associated to Steep Waters (Nejayote) Obtained After Nixtamalization of Different Maize Types. *Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 67, 94-9. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0272-y>
- Rojas-Molina, I., Gutierrez-Cortez, E., Palacios-Fonseca, A., Baños, L., Pons-Hernandez, J. L., Guzmán-Maldonado, S. H., Pineda-Gomez, P., & Rodríguez, M. E. (2007). Study of Structural and Thermal Changes in Endosperm of Quality Protein Maize During Traditional Nixtamalization Process. *Cereal Chemistry*, 84(4), 304-312. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-4-0304>
- Romero Rodríguez, M. (2024). Puesta en marcha y operación de un reactor de digestión anaerobia tratando residuos de alimentos cocinados de las cafeterías de la Universidad Autónoma de Occidente.
- Roy, A., Uddala, S., Saboor, S., Arıcı, M., & Saxena, K. K. (2024). Contemporary roof pattern for energy efficient buildings: Air conditioning cost alleviation, CO2 emission mitigation potential and acceptable payback period. *Journal of Building Engineering*, 95, 110250. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110250>
- Ruiz Pulgarín, J. A. (2024). Implementación de la recirculación del biol en la digestión anaerobia del estiércol avícola.
- Saldaña Oyarzábal, I. (2023). *Method of Production of Alcoholic Beverages From Corn Using an Alkaline Cooking Process, Treatment-Use of Alkaline Cooking Residues for Production of Distilled Alcohol for Purposes of Human Consumption And/or Industrial Use* (Patent Application N.º US20230052560A1). <https://patents.justia.com/patent/20230052560>

- 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. <https://doi.org/10.1139/s03-046>
- Salvador, R., Barros, M. V., Freire, F., Halog, A., Piekarski, C. M., & De Francisco, A. C. (2021). Circular economy strategies on business modelling: Identifying the greatest influences. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126918>
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (1984). NMX-AA-25-1984: Protección al ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos – Determinación del pH – Método potenciométrico. (Esta norma cancela la NOM-AA-25-1975) [Norma Mexicana publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de diciembre de 1984.]. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa025.pdf>
- Secretaría de Economía. (2016). NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001) [Norma Mexicana publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de marzo de 2016.]. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- Shah, S. V., Yadav Lamba, B., Tiwari, A. K., & Chen, W.-H. (2024). Sustainable biogas production via anaerobic digestion with focus on CSTR technology: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 162, 105575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105575>
- SIAP. (2022). <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sillero, L., Sganzerla, W. G., Carneiro, T. F., Solera, R., & Perez, M. (2023). Techno-economic analysis of single-stage and temperature-phase anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse, and poultry manure. *Journal of Environmental Management*, 325, 116419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116419>
- Solarte Toro, J., Mariscal, J. P., & Aristizábal, B. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista Ion, Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*, 30, 105-116. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- Solís, C., Vélez, C., & Ramírez-Navas, J. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11, 26-36. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672017000200026&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200026&nrm=iso)

- Sun, B., Zhong, C., Yu, D., Han, Q., & Tang, J. (2024). Life cycle carbon emission assessment and carbon payback period analysis for the regeneration of old residential areas in cold regions: Case study in Qingdao, China. *Sustainable Cities and Society*, 115, 105860. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105860>
- Szaja, A., Montusiewicz, A., Lebiocka, M., & Bis, M. (2020). The effect of brewery spent grain application on biogas yields and kinetics in co-digestion with sewage sludge. *PeerJ*, 8, e10590. <https://doi.org/10.7717/peerj.10590>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., et al. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización.
- Tewelde, S., Eyalayaran, K., Radhamani, R., & Karthikeyan, K. (2012). Biogas production from co-digestion of brewery wastes [BW] and cattle dung [CD] [Cited by: 23]. *Int. J. Latest Trends Agric. Food Sci.*, 2(2), 90-93. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84893448301&partnerID=40&md5=332bdaabefa143c38ada7fdc7f17ed49>
- Tisocco, S., Lenehan, J. J., Zhan, X., & Crosson, P. (2025). Financial assessment of integrating anaerobic digestion with cattle farming for biomethane production – Implications for farm economics and the supply chain. *Biomass and Bioenergy*, 195, 107702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107702>
- Tovar Gálvez, L. R. (2013). *Método para la captura de CO<sub>2</sub> del biogás utilizando nejayote y recarga de este efluente saturado con CO<sub>2</sub> al mismo digestor anaerobio* (Patente Mexicana N.º MX/a/2012/007621) [Solicitada en 2012, publicada en 2013]. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2012/007621>
- Valderrama-Bravo, C., Fuentes-Prado, E., Porrás-Godínez, M., Ramírez-Ortiz, M., Reyna-Granados, M., & 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/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111058>
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J., Rojas-Molina, A., Beristain, F., & Rodríguez-García, M. (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/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.018>
- Vázquez-López, M., Jiménez-Ocampo, U. E., & Moreno-Andrade, I. (2023). TRATAMIENTO ANAEROBIO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN DEL MAÍZ: UNA REVISIÓN. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales:*

*Investigación, desarrollo y práctica*, 16(1), 309-325. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.85041>

Velázquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Editorial Universitat Politècnica de València.

Zhao, X., Chen, H., Fan, L., Zheng, H., Pan, P., Bian, J., & Yu, Z. (2024). Conceptual waste-to-energy design incorporating plastic pyrolysis and anaerobic digestion: Thermodynamics, economics, and uncertainty analyses. *Energy*, 313, 133835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133835>

Ziero, H. D. D., Ampese, L. C., Buller, L. S., Costa, J. M., Berni, M., & Forster-Carneiro, T. (2023). Corn ethanol production with thin stillage anaerobic digestion for bioenergy recovery: A technical and economic evaluation. *Industrial Crops and Products*, 206, 117618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117618>