

# **Análisis del aprovechamiento de residuos de nixtamalización para generación de biogás.**

**Gabriel Castañeda Núñez y Daniel Espinosa Laganá**  
**Universidad Modelo, Escuela de Ingeniería.**

*<Ingeniería en Energía y Petróleo>*

Diciembre – 2023

## **Resumen**

En el documento se aborda una problemática relacionada con el uso de recursos no renovables y se presenta un proyecto para atenderla, el cual tiene como objetivo analizar la viabilidad de generación de biogás a partir de las aguas residuales del proceso de la nixtamalización del maíz, estas aguas son almacenadas en un biodigestor en donde se produce la fermentación anaerobia de la materia orgánica que da lugar al combustible que puede ser utilizado para diferentes finalidades, sin embargo, la más usual es para cocinar.

De igual manera se presentan antecedentes de proyectos que han realizado este proceso o el cálculo de la producción estimada, la justificación que respalda la finalidad y viabilidad, los resultados que se esperan obtener, así como un cronograma con las actividades que se planean llevar a cabo a lo largo de la ejecución del proyecto.

### *Palabras clave*

Nixtamalización: Proceso mediante el cual se realiza la cocción del maíz con agua y cal, para obtener el nixtamal.

Biodigestor: Contenedor cerrado, hermético donde se deposita materia orgánica dentro de una disolución con agua que se fermenta de manera anaerobia obteniendo como producto principal gas metano.

Biogás: Combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno.

Fermentación anaerobia: Proceso de fermentación que se produce en ausencia de oxígeno.

Materia orgánica: Compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural.

Nejayote: Subproducto líquido que resulta del proceso de nixtamalización, utilizado en la preparación de masa para la producción de tortillas y otros productos a base de maíz. Este líquido, que puede contener residuos de cáscara y cal, plantea desafíos ambientales si no se gestiona adecuadamente.

Fermentación oscura: Proceso anaeróbico en el que microorganismos descomponen materia orgánica compleja, como residuos industriales o aguas residuales, para producir compuestos útiles, como ácidos orgánicos y gases, especialmente biogás. Este proceso ocurre en ausencia de luz y oxígeno, empleando bacterias que realizan la degradación bioquímica de los sustratos orgánicos.

## *Introducción*

En el contexto de la nixtamalización del maíz, una práctica fundamental en la gastronomía mexicana, se plantea un desafío creciente: la gestión de residuos y aguas residuales. Este proyecto de investigación innovador busca transformar estos desechos en una valiosa fuente de energía sostenible a través de la producción de biogás mediante la fermentación anaerobia. Exploraremos la viabilidad de este enfoque, analizando antecedentes, perspectivas y resultados esperados. Con la promesa de convertir un problema ambiental en una solución renovable, este proyecto une tradición e innovación para un futuro más sostenible.

### *Planteamiento del problema a atender*

Actualmente, no solo Mérida o México encuentran dificultades relacionadas con la gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales. Esto genera un problema de impacto ambiental.

Se ha reconocido que en el proceso de producción de harina de maíz (nixtamalización) se genera una cantidad considerable de residuos orgánicos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden llevar a problemas de contaminación y representar un desperdicio de recursos valiosos.

El impacto ambiental de las aguas residuales no tratadas y su liberación en las redes de alcantarillado doméstico es perjudicial para el medio ambiente y no cumple con las regulaciones ambientales. Esto plantea la necesidad de desarrollar un sistema de tratamiento adecuado para las aguas residuales de los establecimientos que procesan el maíz.

### *Estudio previo (antecedentes)*

Estudios previos ofrecen una base sólida para respaldar la viabilidad del proyecto centrado en la producción de biogás a partir de residuos de maíz y materiales orgánicos, así como en la gestión sostenible de residuos agroindustriales, lo que es altamente relevante para el desarrollo de este proyecto.

La nixtamalización es un proceso tradicional de preparación del maíz en el que los granos secos se sumergen en una solución alcalina, generalmente de agua y cal alimentaria (hidróxido de calcio) y se cuecen. Posteriormente, el maíz se escurre y se enjuaga para quitar la cubierta exterior del grano (pericarpio) y se muele para producir una masa que forma la base de numerosos productos alimenticios, incluidas las tortillas y los tamales.

La cocción del grano de maíz en la solución alcalina induce cambios en la estructura del grano, la composición química, las propiedades funcionales y el valor nutricional.

La eliminación del pericarpio conduce a una reducción de la fibra soluble, el proceso de cocción con cal aumenta el contenido de calcio, las proteínas presentes en el grano se vuelven insolubles por la desnaturalización de las mismas.

Según un artículo publicado el 6 de abril del 2023 en la revista de la UNAM, en México la generación de aguas residuales de la industria de nixtamalización del maíz (nejayote) asciende a 14.4 millones de m<sup>3</sup>/año. Este tipo de aguas residuales se distinguen por tener un pH alcalino >10, alto contenido de materia orgánica (33.2 gramos de Demanda Química de Oxígeno/L en promedio) y una relación Demanda Bioquímica de Oxígeno por 5 días/ Demanda Química de Oxígeno de 0.4, indicando que corresponde a un residuo con alta biodegradabilidad a través de su tratamiento por procesos biológicos anaerobios con valorización energética. La fermentación oscura y la digestión anaerobia son procesos que ofrecen alternativas de aprovechamiento de esta agua residual. Algunas investigaciones han reportado rendimientos máximos de 282 mLCH<sub>4</sub>/gDQO y 49.3 NmLH<sub>2</sub>/gDQO, remociones entre el 50% hasta el 95% en términos de DQO. La valorización energética del agua residual de la nixtamalización tiene un potencial energético que puede alcanzar hasta 20.4 kWh/m<sup>3</sup>.

Para aprovechar los residuos del nixtamal (nejayote) y generar biogás, se requiere que pase por un proceso de digestión anaerobia dentro de un biodigestor y pueda ser utilizado como combustible.

Digestión anaerobia: - Es la fermentación microbiana que se produce en ausencia parcial o total de oxígeno y da lugar a una mezcla de gases constituida por metano y dióxido de carbono. El producto principal obtenido de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano en una proporción de 50 a 70% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de 30 a 50%, con pequeñas cantidades de otros componentes como nitrógeno (N), oxígeno (O<sub>2</sub>), hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), estos valores dependen tanto de los microorganismos que se encuentren presentes como del proceso en sí.

El proceso fermentativo de las bacterias anaerobias comprende una serie de procesos, que interactúan entre sí, en una serie de reacciones metabólicas complejas en ausencia de oxígeno. Estos procesos metabólicos se han dividido en 3 grupos o etapas principales:

La primera etapa es la hidrólisis de sólidos insolubles, es decir partículas orgánicas (celulosa o hemicelulosa) o coloides orgánicos (proteínas), en compuestos solubles simples que pueden ser absorbidos a través de la pared celular, para que posteriormente, dichas moléculas hidrolizadas sean catalizadas por bacterias fermentativas en alcoholes y ácidos grasos, teniendo como resultado de este proceso, la producción de hidrógeno y dióxido de carbono.

La siguiente etapa es la acetogénesis en donde se aceleran los procesos metabólicos bacterianos, produce ácido acético a través de la oxidación de ácidos grasos de cadena corta o alcoholes o a través de la reducción del  $\text{CO}_2$ , usando o liberando hidrógeno para la reacción.

Por último, la metanogénesis, la cual se puede llevar a cabo por dos rutas: acetoclástica en la cual los microorganismos crecen en su propio sustrato y la segunda es la hidrogenotrófica en donde los microorganismos crecen en sustratos como hidrógeno y dióxido de carbono, siendo la primera con la que se obtiene mayor cantidad de metano (70%).

Sistema Bio es una empresa social mexicana que se fundó en el 2010 la empresa tiene presencia en México, Nicaragua, Colombia, Kenia e India.

La empresa en el 2015 instaló uno de sus biodigestores prefabricados en una tortillería que lleva por nombre Molino y Tortillería Nicté-ha, ubicada en el municipio de Teabo en el estado de Yucatán. De manera inicial se utilizaba el biogás generado a partir de excretas para uso doméstico, sin embargo, la finalidad era utilizarlo en el proceso de la nixtamalización.

Para este proyecto se analizaron las características de los siguientes tipos de biodigestores:

**Biodigestor tipo Batch:** Este tipo de biodigestor opera en lotes, lo que significa que el proceso se realiza de manera intermitente. El sustrato se carga en el reactor, se sella y se inicia la digestión, para luego vaciar el contenido al final de cada ciclo. Es fácil de operar y mantener, lo que lo hace adecuado para estudios y experimentación en entornos de laboratorio. Además, su flexibilidad y menor inversión inicial lo convierten en una opción viable para aplicaciones a menor escala.

**Biodigestor de Flujo Continuo:** En contraste, el biodigestor de flujo continuo opera de manera constante, con una entrada continua de sustrato y salida constante de efluentes. Aunque más eficiente para aplicaciones a gran escala y producción continua, requiere sistemas más complejos y una mayor inversión. Su estructura es menos flexible para adaptarse a cambios en los sustratos.

**Biodigestor Familiar:** Diseñado para uso doméstico o comunitario, el biodigestor familiar maneja pequeñas cantidades de residuos orgánicos. Su tamaño reducido y facilidad de operación lo hacen apropiado para comunidades con recursos limitados. Puede generar biogás para uso en cocina o iluminación, contribuyendo a la gestión sostenible de residuos.

**Biodigestor de Doble Fase:** Este diseño incorpora dos etapas distintas (hidrolítica y metanogénica) para optimizar la producción de biogás. Ofrece mayor eficiencia y la capacidad de adaptarse a diferentes sustratos. Sin embargo, su complejidad y costos más elevados pueden ser desafíos a considerar.

### *Idea del proyecto para atender la problemática que se plantea (definición)*

Implementar un sistema de tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales con un enfoque en la producción de biogás a partir de los residuos generados (Nejayote) en el proceso de nixtamalización del maíz. Con la fermentación anaerobia como método principal para transformar la materia orgánica en biogás, a través del diseño y construcción de un biodigestor apto, que nos permita transformar dichos residuos y obtener una fuente de energía alterna, que sea viable y redituable.

### *Justificación*

En la actualidad, a nivel mundial se buscan nuevas tecnologías que aseguren la sustentabilidad y sostenibilidad de las actividades humanas. En este contexto, la problemática surge de una gestión inadecuada de los residuos de la producción de harina de maíz, especialmente cuando

las aguas residuales se liberan sin tratamiento en las redes de alcantarillado. Esta práctica no solo tiene un impacto negativo en el medio ambiente, sino que también plantea desafíos desde el punto de vista legal, ya que las regulaciones ambientales y de saneamiento son cada vez más estrictas. La implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de residuos se vuelve imperativa.

A continuación, se presentan algunas Normas Oficiales Mexicanas (NOM) a fines al tratamiento de aguas, las cuales son regulaciones técnicas que establecen las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan representar un riesgo a la seguridad o salud de las personas.

#### NOM-001-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

#### NOM-002-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas, bienes nacionales y proteger la infraestructura de dichos sistemas.

#### NOM-003-SEMARNAT-1997

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población.

Este proyecto se justifica en función de su potencial para mitigar estos desafíos. La producción de biogás a partir de residuos de nixtamalización y aguas residuales a través de la fermentación anaerobia ofrece una solución integral y eficiente. Al reducir significativamente el impacto ambiental de los establecimientos que procesan el maíz mediante la nixtamalización, no solo se alinearía con la búsqueda global de prácticas sustentables, sino que también se posiciona para cumplir con las regulaciones ambientales y evitar sanciones legales. El sistema de tratamiento de aguas residuales y la generación de biogás no solo son una solución rentable, sino que también impulsan la rentabilidad y competitividad de la industria de la tortillería al reducir costos operativos.

La relevancia de este proyecto se acentúa aún más cuando se considera el lugar que ocupa la tortilla de maíz en la alimentación mexicana. Con un consumo per cápita anual de 75 kilogramos, la tortilla es un alimento fundamental y esencial para la población. De acuerdo a datos del Inegi el consumo per cápita en promedio es de nueve tortillas al día, generando una estimación de 20 millones 435 mil 895 kilos de tortilla por día en México, de acuerdo con cifras del Consejo Nacional de la Tortilla.

Según el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2019 existían más de 110 mil tortillerías en

todo el país. De estas, 1675 se encontraban en el estado de Yucatán, siendo el décimo lugar a nivel nacional, y 574 en la ciudad de Mérida, la capital yucateca.

La producción de tortilla depende en gran medida de la masa obtenida de cocer el maíz y la harina procesada de este cereal. El maíz, a su vez, es un cultivo de gran influencia en los mercados internacionales. La importancia de esta materia prima es innegable en México, ya que representa el 12.5% del Producto Interno Bruto Agropecuario (PIB A), con alrededor de 3.1 millones de productores que cultivan este cereal.

La producción de maíz en México es de gran magnitud, y la industria de la tortillería se basa en gran medida en este cultivo. El maíz blanco es el tipo predominante y se destina tanto al consumo humano como al sector pecuario. La relevancia de la tortilla de maíz y la producción de maíz en México subrayan la necesidad de abordar la gestión de residuos y la sostenibilidad en la industria. La producción de biogás a partir de residuos de nixtamalización representa una respuesta concreta y efectiva a estos desafíos, permitiendo la conservación de recursos y la generación de energía renovable.

Este proyecto se justifica por su potencial para promover prácticas sostenibles, cumplir con regulaciones ambientales, reducir costos y mejorar la rentabilidad en la industria de la tortillería, al tiempo que respalda la producción de un alimento esencial y la sostenibilidad de un cultivo clave en México. La producción de biogás a partir de residuos de nixtamalización es una oportunidad inexplorada que puede contribuir significativamente a un futuro más sustentable y saludable.

### *Objetivo general y específicos*

#### General:

Analizar y evaluar el posible desarrollo de un sistema sostenible de tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de residuos del proceso de nixtamalización en una tortillería de Mérida, Yucatán.

#### Específicos:

1. Conocer y analizar el proceso de nixtamalización del maíz.
2. Reconocer e identificar los procesos necesarios para la producción de biogás mediante un biodigestor.



3. Diseñar y construir un biodigestor apto para el tratamiento de aguas residuales y producción de biogás a partir de las mismas.
4. Evaluar los resultados de la implementación del biodigestor.
5. Realizar un análisis de rentabilidad del proyecto a mayor escala.
6. Evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales y su impacto en la reducción de costos y emisiones.
7. Garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales y de saneamiento vigentes.

#### *Análisis del diseño de biodigestor*

Para el diseño del biodigestor en este proyecto, se consideran diversas opciones, siendo el biodigestor trabajando de manera conjunta con la empresa BIOPLAS, desarrollando n un reactor hidrolítico, el cual nos permitirá realizar mediciones de los parámetros fundamentales para la generación de biogás.



**Figura 1.** Diseño del biodigestor.

## *Materiales y métodos.*

**Tabla 1.** Costo total para biodigestor.

<b>Categoría de Material</b>	<b>Descripción del Material</b>	<b>Cantidad Requerida</b>	<b>Costo Estimado por Unidad</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Recipiente</b>	Biodigestor de la marca Bioplas	1 unidad	\$3600	\$3600
<b>Conexiones</b>	Manguera 1 m	1 unidad	\$30	\$30
<b>Instrumentación y Control</b>	Válvulas de Control	1 unidad	\$40	\$40
	Sensor de gas	1 unidad	\$432	\$432
	Termómetro	1 unidad	\$300	\$300
<b>Equipos auxiliares</b>	Probeta	1 unidad	\$383	\$383
	Recipiente rectangular 2L	1 unidad	\$50	\$50
<b>Materiales de Sellado</b>	Corcho, selladores y Adhesivos para Garantizar Estanqueidad	-	\$20 - \$50 por unidad	\$100
<b>Costos Adicionales</b>	Contingencias y Gastos Inesperados	-	\$100 - \$200	\$100 - \$200
	<b>Costo Total Estimado del Biodigestor Piloto</b>	-	-	<b>\$4352 - \$4500</b>

**Tabla 2.** Costo real para biodigestor piloto tipo Batch:

<b>Categoría de Material</b>	<b>Descripción del Material</b>	<b>Cantidad Requerida</b>	<b>Costo Estimado por Unidad</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Recipiente</b>	Matraz Erlenmeyer de 2 litros	1 unidad	Prestado por la universidad Modelo	\$3600
<b>Conexiones</b>	Manguera 1 m	1 unidad	\$30	\$30
<b>Instrumentación y Control</b>	Válvula de control	1 unidad	\$40	\$40
	Sensor de gas	1 unidad	\$432	\$432
	Termómetro	1 unidad	Donado	\$0
<b>Equipos auxiliares</b>	Probeta	1 unidad	Prestado	\$0
	Recipiente rectangular 2L	1 unidad	Donado	\$0

<b>Materiales de Sellado</b>	Corcho, selladores y Adhesivos para Garantizar Estanqueidad	-	\$20 - \$50 por unidad	\$100
<b>Costos Adicionales</b>	Contingencias y Gastos Inesperados	-	\$100 - \$200	\$100 - \$200
	<b>Costo Total Estimado del Biodigestor Piloto</b>	-	-	<b>\$4352</b>

### *Análisis de resultados*

Tomando como punto de partida el “Modelo mexicano para la estimación de biogás” existe una metodología para estimar la emisión de biogás total generada por las aguas residuales mediante la siguiente ecuación:

$$LFG = 2L_0R(e^{-k_e} - e^{-kt})$$

Dónde:

- LFG = Biogás total generado en el año de CH<sub>4</sub> de las aguas residuales.
- 2L<sub>0</sub> = Potencial de generación de CH<sub>4</sub> de las aguas residuales (factor de emisión

por litro).

- R = Tasa promedio de desecho de aguas residuales al año.
- k = Este valor depende de las condiciones locales de clima y la composición de

los residuos.

- c = Tiempo de vida aproximada de la maquinaria utilizada.
- t = Años desde que se está usando la maquinaria que desecha las aguas

residuales.

Se pretende analizar la relación del resultado de la ecuación con el resultado obtenido de biogás en el biodigestor piloto. Dicho resultado se medirá mediante el desplazamiento de agua contenida en una probeta, lo que proporcionará el volumen del biogás generado en centímetros cúbicos.

El sensor de gas servirá para confirmar que el gas producido sea metano.

### *Resultados esperados*

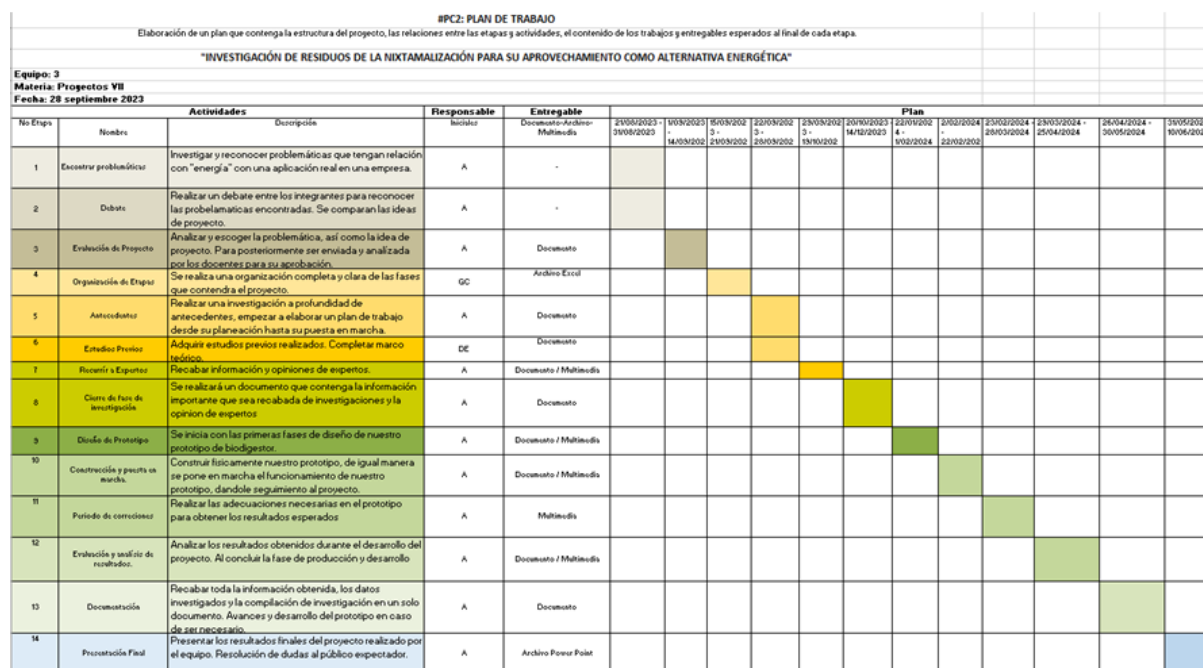
Se espera que este proyecto de investigación arroje los siguientes resultados:

Análisis de la rentabilidad de un sistema de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento, que cumple con las regulaciones ambientales y reduzca las emisiones de metano.

Si los resultados y análisis hechos arrojan resultados positivos se espera tener una producción de biogás a partir de residuos orgánicos, lo que puede contribuir al suministro de energía limpia para la tortillería, reduciendo de esta manera los costos asociados con la gestión de residuos y tratamiento de aguas residuales.

### Plan del proyecto

Se presenta las etapas programadas, así como cada una de sus fases para desarrollar de la mejor manera el proyecto, estableciendo una fecha límite, un formato de entrega y el nombre o nombres de los responsables por actividad planteada.



**Figura 2.** Cronograma de actividades.

*Referencias utilizadas para el desarrollo del proyecto. (IA)*

"Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Wastes: A Review" - Autor: S. T. M. Deublein, et al.  
- Revista: Waste Management - Año de publicación: 2008.

El artículo proporciona información sobre la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, que es relevante para la producción de biogás a partir de residuos de la tortillería.

"Sustainable Management of Agro-Food Industrial Wastes: A Comprehensive Review" -  
Autor: Ananda Kumar Durai, et al. - Revista: Sustainability - Año de publicación: 2017.

Este artículo aborda la gestión sostenible de residuos agroalimentarios y ofrece una visión general de enfoques y tecnologías.

"Biogas Production from Maize Waste: Current State and Perspectives" - Autor: Jana Budde, et al. - Revista: BioMed Research International - Año de publicación: 2015.

Se centra en la producción de biogás a partir de residuos de maíz, lo que es altamente relevante para tu proyecto.

"Anaerobic Digestion: Process, Microbiology, and Applications" - Autor: Nijaz Ibric, et al. -  
Libro - Año de publicación: 2019.

Este libro brinda una comprensión en profundidad de la digestión anaeróbica, un proceso esencial para la producción de biogás.

"Environmental and Economic Sustainability of Biogas Production: A Review" - Autor: Ali Ashraf, et al. - Revista: Renewable and Sustainable Energy Reviews - Año de publicación: 2014.

Explora la sostenibilidad ambiental y económica de la producción de biogás, lo que puede ser relevante para tu proyecto.

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>

*Tortilleria en mérida.* (s. f.). Guialis. <https://merida.guialis.com.mx/tortilleria>

Domínguez, L. (2021, 5 abril). *¿Qué es la nixtamalización?* CIMMYT.

<https://www.cimmyt.org/es/noticias/que-es-la-nixtamalizacion/>

*Ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM).* (s. f.).

<https://1library.co/article/ensayo-de-potencial-bioqu%C3%ADmico-metanog%C3%A9nico-pbm.zx9j6j4z>

De Estadística Y Geografía, I. N. (s. f.). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades*

*Económicas. DENU.* <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denu/default.aspx>

*Yo quiero mi tortilla 100% nixtamalizada - Asociación de Consumidores Orgánicos.* (2018, 25 octubre). Asociación de Consumidores Orgánicos.

<https://consumidoresorganicos.org/yo-quiero-mi-tortilla-100-nixtamalizada/>

