

Área del Conocimiento de Agricultura

OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL BAGAZO DE MALTA DE CERVEZA MEDIANTE HIDROLISIS ENZIMÁTICA

Proyecto de graduación para optar al título de Ingeniero
Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Walpa Reny
Hooker Humphreys

2018-0973U

Br. Yader Antonio
Zavala Valle

2005-20590

Br. Carlos José
Aguirre Álvarez

93-05334-6

MSc. Veronica
Gaitan Muñoz

04 de Mayo de 2026
Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

A Dios el Ser por Excelencia, Creador de todas las cosas y dueño de la sabiduría que nos regaló los medios para llegar a este momento tan oportuno en nuestras vidas y que hizo que este sueño hoy pueda ser realidad.

A nuestros padres, hermanos, esposas e hijos por el amor incondicional hacia nosotros, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por el apoyo constante y por empujarnos a buscar valores que han guiado cada paso de nuestras vidas. Gracias por ser nuestro mayor motivo de esfuerzo, honestidad y perseverancia y por celebrar conmigo cada logro alcanzado. Su confianza ha sido fundamental para no rendirnos.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que creyeron en nosotros, incluso en los momentos en los que dudábamos, y que de alguna manera contribuyeron a que este sueño hoy sea una realidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas.

A nuestra tutora y maestros, por su orientación y aportes, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A nuestros docentes, quienes a lo largo de nuestra formación académica compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo significativamente a nuestro crecimiento profesional y personal. Asimismo, agradecemos a todas las personas de esta institución académica que, de una u otra manera, brindaron su apoyo y contribuyeron al desarrollo de esta culminación de estudios.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional, por su comprensión en los momentos de ausencia y por ser el pilar fundamental que nos impulsó a alcanzar esta meta.

i. RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto propone la valorización del bagazo de malta, principal residuo sólido de la industria cervecera, mediante su transformación en un biofertilizante líquido a través de un proceso de hidrólisis enzimática utilizando papaína. Este subproducto, que representa hasta el 85% de los residuos generados en este sector, posee un alto contenido de materia orgánica, proteínas y compuestos lignocelulósicos, lo que lo convierte en una materia prima con alto potencial para aplicaciones agrícolas sostenibles.

La investigación identifica un vacío en el contexto nicaragüense en cuanto al aprovechamiento del bagazo de malta como abono orgánico mediante tecnologías innovadoras, ya que actualmente su uso se limita principalmente a la alimentación animal. En respuesta a esta problemática, se plantea un proceso biotecnológico que permite la degradación de macromoléculas complejas, facilitando la liberación de nutrientes biodisponibles para las plantas.

Desde el punto de vista ambiental, la propuesta contribuye a la reducción de residuos agroindustriales, disminuye la contaminación asociada a su disposición inadecuada y promueve un modelo de economía circular, en concordancia con la normativa ambiental vigente en Nicaragua. Asimismo, el biofertilizante obtenido mejora la fertilidad del suelo, favorece la actividad microbiana y reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos.

En términos económicos, la viabilidad del proceso depende principalmente de la optimización del uso de la enzima, el control de variables operativas y la ubicación estratégica cercana a la fuente de materia prima, lo que permite reducir costos de transporte y mejorar la eficiencia del sistema productivo.

ii. ABSTRAC

This project proposes the valorization of brewer's spent grain (BSG), the main solid residue generated by the brewing industry, through its transformation into a liquid biofertilizer using an enzymatic hydrolysis process with papain. This by-product, which represents up to 85% of the total residues of the sector, contains high levels of organic matter, proteins, and lignocellulosic compounds, making it a promising raw material for sustainable agricultural applications.

The study identifies a gap in Nicaragua regarding the use of brewer's spent grain as an organic fertilizer through innovative technologies, as its current utilization is mainly limited to animal feed. In response, a biotechnological process is proposed to break down complex macromolecules, allowing the release of nutrients that are readily available for plant uptake.

From an environmental perspective, this approach contributes to reducing agro-industrial waste, minimizing pollution, and promoting a circular economy model aligned with national environmental regulations. Additionally, the resulting biofertilizer improves soil fertility, enhances microbial activity, and reduces dependence on chemical fertilizers.

Economically, the feasibility of the process depends on optimizing enzyme usage, controlling operational parameters, and locating the production system near the raw material source to reduce transportation costs and improve overall efficiency

INDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTE	2
2.1 Contexto internacional	2
2.2 Contexto nacional	2
2.3 Avances tecnológicos: hidrólisis enzimática	2
2.4 Vacío de investigación nacional	3
III. MARCO LEGAL	4
3.1 Normativa ambiental general	4
3.2 Gestión integral de residuos sólidos	4
3.3 Normativas técnicas y políticas complementarias	4
IV. OBJETIVO	5
4.1 Objetivos Específicos	5
V. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	6
5.1 Etapas del proceso de obtención de abono orgánico por medio de hidrólisis enzimática	6
VI. FUNDAMENTOS TÉCNICOS	8
6.1 Bagazo de malta como residuo agroindustrial	8
6.2 Características del bagazo de malta	8
6.3 Hidrólisis enzimática del bagazo de malta	8
6.4 Extracción y preparación de la enzima papaína	9
6.5 Parámetros en el proceso de hidrólisis Enzimática	10
6.6 Calidad del biofertilizante	11
6.7 Impacto ambiental	12
6.8 Evaluación del Impacto Ambiental	12
VII. METODOLOGÍA	14
7.1 Proceso de hidrólisis del bagazo de malta	14
7.2 Estimación de los costos de inversión en el proceso de hidrólisis enzimática	16
7.3 Consideraciones estratégicas para Nicaragua	16
VIII. RESULTADOS	19
8.1 Determinación de las propiedades fisicoquímicas del bagazo de malta	19
8.2 Evaluación de la eficiencia de la hidrólisis enzimática	19

8.3 Evaluación del impacto ambiental.....	19
8.4 Estimación de costos del proceso.....	20
IX. CONCLUSIÓN.....	21
X. RECOMENDACIONES.....	22
XI. BIBLIOGRAFIA.....	23
XII. ANEXOS.....	26

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química del bagazo de Cerveza.....	8
Tabla 2 Indicadores de la eficiencia de hidrólisis.....	11
Tabla 3 Caracterización de la materia orgánica y nitrógeno del abono.....	11
Tabla 4 Matriz de prevención de contaminación.....	13
Tabla 5 Costo de equipos principale.....	16
Tabla 6 Costos de materia prima por lote.....	17
Tabla 7 Costos directos por lote.....	18

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Extracción del látex de papaya 26

Figura 2, Diagrama de bloque obtención de papaína y del proceso de hidrolisis. 27

Figura 3. Diagrama de flujo sobre la producción de abono orgánico. 28

I. INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de los residuos generados por la industria cervecera representa un desafío ambiental significativo que requiere la implementación de soluciones innovadoras y sostenibles. Entre los principales subproductos sólidos de este sector se encuentra el bagazo de malta, el cual se genera en grandes cantidades durante el proceso de elaboración de la cerveza.

El bagazo de malta es un material lignocelulósico rico en compuestos orgánicos, destacándose su contenido de fibra estructural como celulosa y hemicelulosa, además de proteínas (aproximadamente 20%), lípidos (alrededor del 8%) y compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes. Estas características le confieren un alto potencial como fuente de nutrientes, lo que ha motivado diversos estudios orientados a su valorización dentro de esquemas de economía circular y sostenibilidad ambiental. A nivel global, el bagazo cervecero representa aproximadamente el 85% de los residuos sólidos generados en la industria cervecera, con una producción anual estimada entre 35 y 40 millones de toneladas.

En Nicaragua tradicionalmente, este residuo ha sido utilizado en el ámbito agrícola o como alimento para animales; sin embargo, su potencial como materia prima para la obtención de biofertilizantes aún no ha sido plenamente aprovechado, evidenciando un desaprovechamiento de sus propiedades nutricionales en aplicaciones agrícolas. En este contexto, surge la necesidad de implementar tecnologías que permitan maximizar su aprovechamiento y contribuir a la reducción del impacto ambiental asociado a su disposición.

La hidrólisis enzimática se presenta como una alternativa eficiente para la transformación del bagazo de malta, ya que emplea enzimas específicas capaces de descomponer los componentes estructurales complejos, liberando nutrientes en formas más biodisponibles para las plantas. Este proceso ofrece ventajas frente a métodos tradicionales, menor impacto ambiental y condiciones de operación moderadas.

En este sentido, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar la producción de abono orgánico a partir del bagazo de malta mediante hidrólisis enzimática, analizando la eficiencia del proceso, la composición nutricional del producto obtenido, así como su viabilidad técnica, económica y ambiental, con el propósito de contribuir al aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales en Nicaragua.

II. ANTECEDENTE

2.1 Contexto internacional

La producción de abonos orgánicos a partir de residuos biodegradables ha sido ampliamente estudiada a nivel internacional como una alternativa sostenible frente al uso de fertilizantes químicos convencionales. Diversas investigaciones se han centrado en técnicas como el compostaje tradicional, el vermicompostaje y el manejo integral de residuos orgánicos, evaluando su impacto en la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos.

En el caso específico del bagazo de malta de cerveza, los estudios internacionales reportan que su principal uso ha sido como suplemento en la alimentación animal, debido a su alto contenido proteico y energético, así como materia prima en procesos biotecnológicos, incluyendo la producción de biogás, enzimas y compuestos de valor agregado (Mussatto, 2006; Lynch, 2016).

Sin embargo, el uso del bagazo de malta como abono orgánico mediante procesos avanzados como la hidrólisis enzimática aún es limitado a nivel global, lo que evidencia un campo de investigación emergente con alto potencial de desarrollo.

2.2 Contexto nacional

En el contexto nicaragüense, no se encuentran antecedentes específicos que documenten el uso del bagazo de malta como materia prima para la producción de abono orgánico mediante hidrólisis enzimática. No obstante, existen iniciativas orientadas a la promoción de prácticas agrícolas sostenibles.

Organizaciones como el Grupo de Promoción de la Agricultura Ecológica (GPAE) han impulsado el uso de abonos orgánicos y técnicas agroecológicas en comunidades rurales, fomentando alternativas sostenibles para la producción agrícola. Asimismo, estudios desarrollados en la Universidad Nacional Agraria (UNA) han demostrado la efectividad del compostaje en la mejora de la fertilidad del suelo y el rendimiento de cultivos. (UNA s.f.).

Por otra parte, la Compañía Cervecera de Nicaragua (CCN) ha implementado prácticas de gestión ambiental enfocadas en la valorización del bagazo de malta, el cual es reutilizado principalmente como alimento para ganado, evidenciando un aprovechamiento parcial de este residuo (CCN, 2016.).

Sin embargo, estas iniciativas no contemplan el uso del bagazo de malta como biofertilizante mediante procesos biotecnológicos, lo que confirma la ausencia de estudios aplicados en este campo a nivel nacional.

2.3 Avances tecnológicos: hidrólisis enzimática

A nivel internacional, la hidrólisis enzimática ha demostrado ser una tecnología eficiente para la degradación de residuos lignocelulósicos, permitiendo la liberación de nutrientes y compuestos bioactivos en menor tiempo en comparación con métodos tradicionales como el compostaje.

Diversos estudios han reportado que el uso de enzimas específicas permite reducir los tiempos de estabilización de semanas a pocas horas, además de obtener productos con características fisicoquímicas más controladas. Así mismo, la incorporación de enzimas y microorganismos solubilizadores ha mostrado mejoras significativas en la disponibilidad de nutrientes y en el rendimiento de los cultivos.

No obstante, la aplicación de esta tecnología al bagazo de malta como fuente directa para la producción de abono orgánico sigue siendo limitada, especialmente en contextos latinoamericanos.

2.4 Vacío de investigación nacional

En función de lo anterior, se identifica un vacío científico y tecnológico relevante: a pesar del uso extendido de abonos orgánicos en Nicaragua y del creciente interés por la agricultura sostenible, no se han documentado estudios que integren la hidrólisis enzimática como método para la valorización del bagazo de malta en la producción de biofertilizantes.

Este vacío representa una oportunidad de innovación, considerando la disponibilidad de este residuo agroindustrial en el país y su potencial impacto positivo en términos ambientales, agrícolas y económicos.

III. MARCO LEGAL

En Nicaragua, aunque no existe una normativa específica que regule el uso del bagazo de malta de cerveza para la producción de abono orgánico, el desarrollo de este tipo de iniciativas se encuentra respaldado por un marco legal orientado a la protección del medio ambiente, la gestión integral de residuos sólidos y la promoción de prácticas productivas sostenibles.

3.1 Normativa ambiental general

La Ley No. 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, constituye el principal instrumento jurídico en materia ambiental en Nicaragua. Esta ley establece los principios fundamentales para la conservación, protección y uso sostenible de los recursos naturales, tales como la prevención, el desarrollo sostenible y la responsabilidad ambiental. (Asamblea Nacional de Nicaragua 1996).

Asimismo, contempla instrumentos de gestión ambiental como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), la cual es aplicable a proyectos que puedan generar efectos sobre el entorno. En este sentido, la valorización de residuos industriales mediante su transformación en biofertilizantes se alinea con los principios de prevención de la contaminación y uso racional de los recursos.

3.2 Gestión integral de residuos sólidos

La Ley No. 755, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, establece el marco normativo para la prevención, reducción, reutilización, reciclaje y disposición final adecuada de los residuos. Esta ley promueve el aprovechamiento de residuos biodegradables y fomenta la responsabilidad compartida entre los generadores, el Estado y la sociedad. (Asamblea Nacional de Nicaragua 2010).

En este contexto, el bagazo de malta puede ser considerado un residuo orgánico susceptible de valorización, lo que respalda su transformación en abono orgánico mediante procesos tecnológicos como la hidrólisis enzimática.

3.3 Normativas técnicas y políticas complementarias

De manera complementaria, la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 05 014-02 establece lineamientos para el manejo de residuos orgánicos y la producción de abonos, regulando aspectos relacionados con la calidad del producto, el control de procesos y la protección del suelo (Legislación Nicaragua 2002).

Asimismo, instituciones como el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA) y el Ministerio de Salud (MINSa) promueven políticas orientadas a la reducción de la contaminación, la protección de la salud pública y el uso de tecnologías limpias. (MARENA. 2022).

En este sentido, el presente proyecto se encuentra alineado con las políticas de desarrollo sostenible, al fomentar el aprovechamiento de residuos agroindustriales, la reducción del impacto ambiental y la promoción de la economía circular en el contexto nicaragüense.

IV. OBJETIVO

➤ Desarrollar un abono orgánico a partir del bagazo de malta de cerveza mediante hidrolisis enzimática, con el fin de obtener un biofertilizante que contribuya a mejorar la calidad del suelo.

4.1 Objetivos Específicos

➤ Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del bagazo de malta de cerveza para determinar su potencial como materia prima en la producción de abono orgánico.

➤ Determinar la eficiencia de la hidrolisis enzimática del bagazo de malta de cerveza evaluando la degradación de la materia orgánica y composición nutricional resultante con el fin de obtener un biofertilizante de alta calidad.

➤ Evaluar el impacto ambiental del abono orgánico mediante la aplicación de normativas ambientales para contribuir a la prevención de la contaminación y conservación del medio ambiente.

➤ Estimar los costos de inversión en el proceso de hidrolisis enzimática del bagazo de malta de cerveza mediante la regulación de variables que optimicen la eficiencia del proceso para la producción del biofertilizante.

V. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en la obtención de abono orgánico a partir de malta de cerveza mediante hidrólisis con técnicas controladas que permitan ofrecer un abono líquido que contenga un alto valor nutricional para el suelo. El tipo de estudio de este proyecto se enfoca en la creación de una agroindustria que aprovecha la disponibilidad local de materia prima y pueda generar productos de valor agregado.

El bagazo de malta de cerveza se obtiene como subproducto del proceso de elaboración de cerveza, específicamente durante la etapa de filtración del mosto. Este residuo se genera en grandes cantidades y presenta un alto contenido de humedad, lo que condiciona su manejo y aprovechamiento. El bagazo de malta es un subproducto sólido rico en compuestos lignocelulósicos, proteínas y otros nutrientes, lo que le confiere un alto potencial de valorización. (Mussatto et al., 2006).

Durante el proceso de producción, la malta germinada se seca a temperaturas entre 50°C y 60 °C durante un periodo de 24 a 48 horas, con el fin de detener la germinación y desarrollar características sensoriales. Posteriormente, en la etapa de filtración del mosto, se separan los componentes sólidos (bagazo de malta) de la fracción líquida, operando a temperaturas de 65 °C a 70 °C, donde el bagazo presenta un contenido de humedad entre 70% y 80% (Lynch et al., 2016).

El bagazo, luego de la extracción del mosto, contiene polisacáridos, almidón residual y proteínas, los cuales pueden ser transformados en compuestos más simples y solubles mediante la acción de enzimas específicas como amilasas, celulasas y proteasas (Pandey, 2000).

La hidrólisis enzimática permite la degradación controlada de estas macromoléculas, generando un material con mayor disponibilidad de nutrientes y mejores características para su aprovechamiento agrícola, además de facilitar su manejo al reducir su complejidad estructural (Sun & Cheng, 2002).

5.1 Etapas del proceso de obtención de abono orgánico por medio de hidrólisis enzimática

- Generación y recolección del bagazo, El bagazo de malta se genera durante la etapa de filtración del mosto, donde se separan los sólidos insolubles de la malta. Este residuo es recolectado inmediatamente para evitar procesos de degradación microbiológica (Lynch et al., 2016).
- Transporte y almacenamiento temporal El bagazo es transportado hacia el área de procesamiento y almacenado por periodos cortos bajo condiciones controladas, debido a su alto contenido de humedad y susceptibilidad a la descomposición (Mussatto 2006).
- Pretratamiento del bagazo de malta El bagazo es sometido a un pretratamiento físico que incluye la reducción del tamaño de partícula, con el objetivo de mejorar la accesibilidad de las enzimas al sustrato lignocelulósico (Sun & Cheng, 2002).

- Preparación del sistema de hidrólisis enzimática El material pretratado se mezcla con agua para formar una suspensión homogénea, ajustando condiciones operativas como pH entre 5.0 y 7.0 y temperaturas entre 50 °C y 65 °C, rangos óptimos para la actividad de enzimas hidrolíticas.
- Adición de enzimas y reacción de hidrólisis Se incorporan enzimas específicas al sistema, iniciando la degradación de los componentes estructurales del bagazo en compuestos solubles, bajo condiciones controladas de tiempo entre 4 y 6 horas, lo que favorece la eficiencia del proceso.
- Separación solido-liquido por medio de un filtro por prensa. El contenido de humedad de la tota resultante suele oscilar entre el 30 y el 45%, dependiendo de las características del material (Roxia s.f.).

VI. FUNDAMENTOS TÉCNICOS

El presente capítulo expone los fundamentos técnicos y teóricos que sustentan el desarrollo del proyecto de obtención de abono orgánico a partir del bagazo de malta mediante hidrólisis enzimática. Se abordan las propiedades de este residuo orgánico, su potencial de valorización y los principios que rigen su transformación en un biofertilizante, integrando criterios de ingeniería química, ambientales y económicos.

6.1 Bagazo de malta como residuo agroindustrial

El bagazo de malta de cerveza es el principal residuo sólido generado durante el proceso de elaboración de cerveza, específicamente en la etapa de maceración, donde se separan los azúcares fermentables del grano de cebada malteada. Este subproducto representa entre el 80% y el 85% de los residuos sólidos de la industria cervecera ([Alonso Riaño, 2022](#)).

Desde el punto de vista fisicoquímico, está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, lípidos y minerales, lo que le confiere un alto contenido de materia orgánica y nutrientes esenciales. Sin embargo, su elevada humedad y su estructura lignocelulósica limitan su uso directo, requiriendo tratamientos previos para su aprovechamiento. ([Wagner, 2021](#))

6.2 Características del bagazo de malta

La caracterización fisicoquímica es fundamental para determinar la viabilidad del bagazo como materia prima en la producción de abono orgánico. Parámetros como pH, contenido de humedad, materia orgánica, nitrógeno total y relación carbono/nitrógeno (C/N) permiten evaluar su comportamiento en procesos biotecnológicos ([FAO, 2019](#)).

Tabla 1
Composición química del bagazo de Cerveza

Componente (% peso seco)	Porcentaje
Celulosa	16.8% - 25.4%
Hemicelulosa	21.8% - 28.4%
Proteína	15.2% - 25%
Lignina	11.9% - 27.8%
Lípidos	10.6%
Cenizas	2.4% - 4.6%

Nota. Adaptado de *Mussatto (2006)*.

La relación C/N influye directamente en la biodegradabilidad del material y en la disponibilidad de nutrientes, siendo un parámetro clave en la producción de biofertilizantes ([Bernal, 2021](#)).

6.3 Hidrólisis enzimática del bagazo de malta

La hidrólisis enzimática es un proceso biotecnológico que emplea enzimas para degradar macromoléculas complejas en compuestos más simples y biodisponibles. En materiales lignocelulósicos, este proceso permite la ruptura de celulosa, hemicelulosa y proteínas ([Nyhan, 2023](#)).

Las enzimas utilizadas incluyen celulasas, hemicelulasas y proteasas, cuya actividad depende de variables como pH, temperatura, tiempo de reacción y concentración enzimática (Lalić 2025).

Para lograr la bioconversión de biomasa con cero emisiones mediante pretratamiento alcalino, se debe emplear un álcali más respetuoso con el medio ambiente. El hidróxido de potasio (KOH) se ha utilizado como un álcali fuerte para el tratamiento de diversos materiales de biomasa y puede aportar potasio (K) a las aguas residuales para el crecimiento de las plantas. Esto sugiere que los residuos líquidos generados en el proceso de tratamiento con KOH deberían reutilizarse como fertilizante líquido. El efecto del pretratamiento con KOH en la hidrólisis enzimática es viable de utilizarlo en residuos lignocelulósicos para facilitar el crecimiento de las plantas (Wang 2021).

El BSG contiene proteínas de reserva denominadas hordeínas, que son ricas en prolina y glutamina, lo que las hace resistentes a la degradación natural, en particular, la papaína actúa como una endopeptidasa que rompe enlaces peptídicos internos, facilitando la liberación de aminoácidos. El uso de la papaína como enzima facilita la hidrólisis de estas proteínas complejas, transformándolas en péptidos de cadena corta y aminoácidos libres.

De forma general, la transformación de estos compuestos mediante la hidrólisis enzimática con papaína puede representarse como:

Celulosa → Glucosa
Proteínas → Aminoácidos

Esta transformación no sólo reduce el volumen del residuo sólido, sino que incrementa la biodisponibilidad de nitrógeno y fósforo, elementos críticos para el desarrollo de las raíces de las plantas. Al final del proceso de hidrólisis, se obtiene un biofertilizante con una alta densidad de carbono orgánico soluble y péptidos bioactivos, lo que garantiza una asimilación inmediata por parte de la microbiota del suelo y una mejora sustancial en el vigor de los cultivos frente a los métodos de compostaje tradicionales.

A diferencia de otros procesos que sólo degradan fibras, la papaína rompe específicamente los enlaces peptídicos de las proteínas remanentes en el bagazo, liberando una alta concentración de nitrógeno orgánico en forma de aminoácidos libres.

6.4 Extracción y preparación de la enzima papaína

Se realizan incisiones longitudinales en frutos verdes completamente desarrollados con cuchillo de plástico o de acero inoxidable ya que no se debe utilizar materiales oxidables para este proceso. La profundidad de las incisiones debe ser aproximadamente 2 mm y la edad de los frutos fue de 2 a 3 meses. Si se extrae látex de los frutos antes de que lleguen a esta edad, se puede alterar su desarrollo y madurar prematuramente. (Balcázar, 2012).

El látex es un líquido viscoso y fácilmente se puede deteriorar es conveniente usar aditivos que conserven su calidad, después de su extracción. Se usa Bisulfito de Sodio en concentración 0,5% (p/p), como regulador de pH y antioxidante y Citrato de sodio en

concentración de 4% (p/p) como agente amortiguador de pH, anticoagulante luego se almacena a 4°C (Yugcha A s.f.).

Se usa sulfato de amonio para purificar impurezas en el látex mediante centrifugación en cantidades de 15% (p/p) una concentración mayor provoca la precipitación de la enzima desde el látex (Balcázar, 2012).

El látex se solubiliza y se diluye en alcohol etanol al 96% (en volúmenes de 1: 3, volumen filtrado/ etanol). Se realiza centrifugado a 8000 rpm por 5 min y 4 °C; al líquido centrifugado se añade etanol al 96% (en volúmenes de 1: 3, volumen filtrado/ etanol). Se centrifuga nuevamente a 8000 rpm por 5 min y 4 °C posteriormente la muestra se congela hasta -65 °C por 12 horas aproximadamente, y se somete a un proceso de liofilización por 24-36 horas, a presión de vacío de 0,1 - 0,6 mbar y con temperatura de colector de -84 a -85 ° C; se envasó en botellas de vidrio oscuras, y finalmente se almacenó en ambiente limpio, bajo sombra y ventilado. (Rivera, 2023).

6.5 Parámetros en el proceso de hidrólisis Enzimática

Al diseñar el proceso de solubilización enzimática de bagazo de malta, se deben considerar varios factores importantes. Los más relevantes son las condiciones de procesamiento (principalmente temperatura, pH y tiempo de reacción); el tipo, el orden y la concentración de las enzimas utilizadas; el tipo de ruta de tratamiento con diferentes combinaciones de enzimas (secuencial o simultánea); así como el contenido de materia seca de BSG a procesar (Lench, 2022).

Para optimizar el rendimiento en el bagazo de malta con papaína, se debe controlar los siguientes parámetros:

- **Tamaño de Partícula y Agitación:** Un pretratamiento mecánico para reducir el tamaño de partícula aumenta el área superficial disponible para la enzima. La agitación en el biorreactor debe ser controlada para mantener la homogeneidad sin desnaturalizar la enzima por esfuerzos de corte excesivos. (Lench, 2022).
- **Relación Sólido-Líquido:** Se recomienda una relación de 1:10 a 1:15 (p/v). Una cantidad de agua (1:10) facilita la transferencia de masa y reduce la viscosidad, pero puede diluir demasiado el nitrógeno final (Castilla 2023).
- **Control de Temperatura y pH:** La papaína tiene un rango de actividad óptimo (generalmente 60°C y pH 6.8). Las fluctuaciones reducen drásticamente la conversión enzimática. (Treimo, 2008).
- **Relación Sustrato-Enzima:** La concentración de papaína frente a la masa de bagazo de malta debe ser 2% con respecto al sustrato seco lo que determina mejor rendimiento de aminoácidos y péptidos en el biofertilizante (Treimo, 2008).

Tabla 2
Indicadores de la eficiencia de hidrólisis

Concepto Teórico	Manifestación en el Proyecto	Efecto en el Biofertilizante
Proteólisis	Biodisponibilidad	Aumento de Nitrógeno soluble
Solubilización	Paso de fase sólida a líquida	Mayor homogeneidad del abono
Biodisponibilidad	Reducción de peso molécula	Mejor absorción en las raíces de las plantas.

Nota. Elaboracion propia

- Bioestimulación: El alto contenido de L-aminoácidos resultantes de la hidrólisis actúa como un potente anti-estrés para cultivos afectados por la variabilidad climática del Corredor Seco.
- Sostenibilidad Local: Nicaragua posee una producción agrícola de papaya que garantiza el suministro de látex (papaína cruda), permitiendo una producción de biofertilizantes con baja huella de carbono y costos operativos reducidos.
- Calidad del Producto: A diferencia de los fertilizantes químicos, este biofertilizante aporta carbono orgánico, fundamental para recuperar el microbiota de suelos degradados por el monocultivo

Desde la perspectiva de la ecología industrial, la eficiencia de este proceso en Nicaragua se fundamenta en el aprovechamiento de subproductos locales. La papaína, al ser un recurso endógeno, permite que la industria cervecera cierre su ciclo de materiales bajo el modelo de economía Circular, transformando un residuo de bajo valor en un insumo estratégico para la agricultura nacional.

6.6 Calidad del biofertilizante

Tabla 3
Caracterización de la materia orgánica y nitrógeno del abono

Parámetro Valor	Promedio (Base Seca)	Potencial como Abono
Nitrógeno Total (N)	1.2% - 3.6%	Alto (Excelente aporte para el crecimiento vegetal).
Fósforo (P_2O_5)	0.4% - 0.6%	Moderado
Potasio (K_2O)	0.4% - 0.6%	Bajo (Requiere complementación).
Carbono orgánico	45% - 50	Alto (Aporta estructura y energía al suelo)
Relación C/N	12:1 a 15:1	Baja (Indica una rápida descomposición).

Nota. Elaboración Propia

La hidrólisis enzimática del bagazo de malta permite obtener un abono orgánico con mejores características fisicoquímicas, incrementando la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del producto (Mainardis, 2024).

La calidad del biofertilizante se evalúa mediante parámetros como: materia orgánica, pH, relación C/N y contenido de nutrientes, estos factores influyen directamente en la fertilidad del suelo y en la productividad agrícola (FAO, 2019).

6.7 Impacto ambiental

La valorización del bagazo de malta como biofertilizante representa una alternativa ambientalmente favorable frente a su disposición convencional. Este enfoque reduce la generación de residuos, disminuye la contaminación y promueve el aprovechamiento de subproductos agroindustriales (Himmel 2018).

Asimismo, contribuye a mejorar la calidad del suelo y a fomentar prácticas agrícolas sostenibles, en concordancia con normativas ambientales vigentes (FAO, 2019).

El aporte Nutricional destaca un contenido de proteína cruda entre el 15% y 24%, lo que garantiza una fuente de nitrógeno orgánico. Tras la hidrólisis con papaína y el posterior compostaje, el abono resultante presenta una densidad nutricional superior a los abonos tradicionales como el estiércol de bovino puro.

Relación Carbono/Nitrógeno (C/N): Se estima una relación teórica de 20:1 a 30:1, la cual es considerada ideal para procesos de transformación biotecnológica sin pérdida excesiva de nitrógeno por volatilización.

Dada la disponibilidad estacional de residuos agrícolas en Nicaragua, el bagazo de malta se perfila como un catalizador del proceso de compostaje. Su alta porosidad interna y contenido de celulosa y lignina favorecen la formación de un compost con alta capacidad de retención de humedad, una característica vital para mitigar los efectos de la sequía en las zonas productoras del país.

6.8 Evaluación del Impacto Ambiental.

La contaminación causada por los residuos de las cervecerías es alarmante, ya que se ha informado que causa un deterioro significativo de la flora y la fauna. La alteración de las características fisicoquímicas del agua y el aumento de la concentración de metales pesados afectan gravemente la calidad de vida de los consumidores. Asimismo, el uso de agua contaminada en electrodomésticos conlleva graves riesgos para la salud.

La acumulación de bagazo sin tratamiento genera lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero, problemas que pueden mitigarse mediante su conversión en bioproductos (Nigam, 2017).

La hidrólisis enzimática permite una degradación controlada de la celulosa y hemicelulosa, transformando la estructura fibrosa del BSG en nutrientes asimilables.

Los resultados teóricos indican que la transición de fertilizantes sintéticos a abono orgánico cumple con los principios de prevención establecidos por el MARENA.

El uso de abonos orgánicos actúa como una medida de mitigación directa contra la degradación de suelos, la aplicación de estas técnicas favorece el cumplimiento del Decreto 20-2017, al reducir la carga de contaminantes químicos que suelen filtrarse hacia los mantos acuíferos nicaragüense. Mediante el aprovechamiento del bagazo de malta se reduce la cantidad de lixiviados orgánicos hacia el acuífero de Managua o las cuencas del Pacífico.

La sustitución de fertilizantes de síntesis química por abonos orgánicos genera una respuesta positiva en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo nicaragüense. También el uso de abono orgánico contribuye a la fijación de carbono en el suelo, alineándose con los compromisos de Nicaragua ante el Acuerdo de París y la Política Nacional de Cambio Climático.

Se estima una recuperación del 40% en la microbiota del suelo en comparación con terrenos bajo manejo químico intensivo, favoreciendo la presencia de micorrizas y bacterias fijadoras de nitrógeno.

Se ha diseñado una matriz de impacto basada en la comparación entre el escenario actual (uso de químicos) y el escenario propuesto (normativa y abono orgánico):

Tabla 4
Matriz de prevención de contaminación

Indicador de Contaminación	Escenario con Fertilizante Químico	Escenario con Abono Orgánico (Bajo Norma)	Impacto Ambiental Neto
Salinización del suelo	Alta (por acumulación de sales)	Nula / Reversible	Recuperación de suelos
Eutrofización de aguas	Crítica (escorrentía de fosfatos)	Mínima (liberación lenta)	Protección hídrica
Huella de Carbon	Elevada (producción industrial)	Baja (reciclaje de biomes')	Mitigación climática

Nota. Elaboración propia

Se emplea como estrategia de economía circular al utilizar los residuos agropecuarios ya que dejan de ser una fuente de contaminación (metano en vertederos) para convertirse en un insumo que regenera el paisaje productivo.

Esto cumple directamente con el Plan Nacional de Desarrollo Humano (PNDH) en su eje de protección de la Madre Tierra.

VII. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló en correspondencia directa con los objetivos específicos y con la naturaleza documental, descriptiva y proyectando un estudio a la obtención de un biofertilizante a partir del bagazo de malta mediante hidrólisis enzimática.

Al no contemplarse trabajo de campo, ensayos experimentales o mediciones instrumentales, el proceso metodológico se fundamenta en la recopilación sistemática de información secundaria, la revisión crítica de literatura científica y técnica, la consulta de normas nacionales e internacionales y la modelación conceptual de los componentes técnicos, ambientales, económicos y financieros del proyecto.

7.1 Proceso de hidrólisis del bagazo de malta

- **Materia prima:** Se utiliza bagazo de malta de cerveza como materia prima principal, obtenido inmediatamente después del proceso de filtración del mosto. El material presentó un contenido de humedad aproximado entre 70% y 80%.
- **Pretratamiento del bagazo:** El bagazo es sometido a un pretratamiento físico que incluyó a la reducción del tamaño de partícula y homogeneización del material, lo que permite aumentar el área superficial y mejorar la interacción enzima-sustrato.
- **Preparación del sistema de reacción:** El bagazo pretratado se mezcla con agua en una relación sólido-líquido de 1:10, formando una suspensión homogénea. Se ajustan las condiciones operativas pH 6.8 y temperatura 60 °C debido a que estas condiciones favorecen la actividad de la enzima papaína.

Si partimos de 125 kg de Bagazo de malta con 20% de humedad.

Cantidad de Bagazo seco = 125 Kg X 80% = 100 Kg

Agua inicial en el Bagazo = 125 Kg x 20% = 25 Kg

Relación de Sólido-líquido: Para 100Kg de bagazo seco se requiere 100x10= 1000 kg de agua total. Como ya tenemos 25 Kg de agua en el bagazo de malta inicial que corresponde al 20% calculamos el agua restante para llegar a los 1000 Kg que equivalen a la relación 1:10

Agua añadida = 1000 kg – 25 Kg = 975 Kg de agua lo que equivale a 975 Litros de agua.

$$\text{Masa total de la mezcla} = 125kg_{(\text{Bagazo } 20\% \text{ de Agua})} + 975kg_{(\text{agua})} = 1100 \text{ Kg}$$

El consumo estimado de KOH es 0.05 mol/kg de mezcla

Moles totales de KOH = 1100kg x 0.05 = 55 moles de KOH

$$\text{Masa de KOH (pureza 90\%)} = \frac{55\text{mol} \times 56.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.90} = 3428.33\text{g} = 3.43 \text{ Kg}$$

- **Hidrólisis enzimática:** Se adiciona papaína en una concentración de 2% respecto al peso seco del bagazo lo que equivale a 2kg de papaína. La reacción se mantuvo bajo agitación constante durante un periodo de 6 horas a 60°C. Durante esta etapa se produjo

la degradación de proteínas y la liberación de compuestos solubles, principalmente aminoácidos.

$$\begin{aligned} \text{Entrada al reactor} &= 125\text{kg}_{\text{Bagazo humedo}} + 975\text{kg}_{\text{Agua}} + 3.42\text{kg}_{3.42} + 2\text{kg}_{\text{Papaina}} \\ \text{Entrada al reactor} &= 1105.42\text{kg} \\ \text{Salida del reactor} &= 1105.42\text{kg} \end{aligned}$$

Para calcular la cantidad de nitrógeno solubilizado primero calculamos la cantidad de proteína.

$$\text{Masa Proteína} = 100\text{Kg (MS)} \times 0.25 = 25 \text{ Kg de proteína}$$

Utilizamos el factor de conversión estándar para proteínas vegetales
Metodo de Kjeldal, que es 6.25 donde Proteína es $N \times 6.25$

$$N_{\text{total}} = 25\text{kg} / 6.25 = 4\text{kg}$$

Esto significa que 100 Kg de bagazo de malta seco hay 4 kg de nitrógeno total, pero de esto solo se solubiliza el 35%

$$N_{\text{Soluble}} = (4\text{kg})(35\%) \quad N_{\text{Soluble}} = 1.4\text{kg}$$

Para el cálculo de la concentración de nitrógeno en el biofertilizante. Si utilizas una relación sólido-líquido de 1:10 (100 kg de bagazo de malta en 1000 litros de agua) el nitrógeno se distribuirá en ese volumen:

$$\text{Conc}_N = 1.4 \text{ kg de N} / 1000\text{L} = 0.0014 \text{ kg/L} \quad \text{Conc}_N = 1.4 \text{ g/L}$$

➤ Inactivación enzimática: Finalizada la reacción, se elevó la temperatura del sistema entre 85 °C y 90 °C durante 10 a 15 minutos, con el objetivo de desnaturalizar la enzima y detener el proceso de hidrólisis.

➤ Separación de fases: El material obtenido es sometido a filtración. Debido a que en el proceso de filtrado por prensa la torta aun retiene un 30% de humedad lo que corresponde a 300 kg de agua debido a que el proceso tiene solo 1000kg de agua inicial entonces el biofertilizante líquido sería:

$$\begin{aligned} \text{Fase}_{\text{Liq}} &= 1000\text{kg}_{\text{Agua}} + 3.42\text{kg}_{\text{KOH}} + 2\text{kg}_{\text{papaina}} + 1.4\text{kg}_{\text{N soluble}} + 8.75\text{kg}_{\text{Proteína soluble}} \\ \text{Biofertilizante} &= 1015.57\text{kg} - 300\text{kg}_{\text{Agua}} \\ \text{Biofertilizante} &= 715.57\text{kg} \end{aligned}$$

La fase sólida que sería la torta de bagazo hidrolizado sería:

$$\begin{aligned} \text{Fase Sólida} &= 100\text{kg}_{\text{Bagazo seco inicial}} - 1.4\text{kg}_{\text{N soluble}} - 8.75\text{kg}_{\text{Proteína Soluble}} \\ \text{Bagazo hidrolizado} &= 89.85 \text{ kg} + 300\text{kg}_{\text{Agua}} \\ \text{Bagazo hidrolizado} &= 389.85 \text{ kg} \end{aligned}$$

7.2 Estimación de los costos de inversión en el proceso de hidrólisis enzimática.

Desde el enfoque de la ingeniería química, el proceso debe evaluarse considerando variables técnicas y económicas. Los costos incluyen equipos, consumo de enzimas, energía y control de condiciones operativas ([Hernández 2018](#)).

El control adecuado de estas variables permite optimizar el rendimiento del proceso y garantizar su viabilidad a escala piloto o industrial ([Lalić, 2025](#)).

Para estimar los costos de inversión en la producción es fundamental que el CAPEX (Gasto de Capital) este directamente condicionado por la eficiencia del proceso, la cual depende de una regulación estricta de variables críticas ([Peters, 2003](#))

Tabla 5
Costo de equipos principales

Equipo	Costo base (USD)
Molino (reducción de tamaño)	10,000
Tanque de mezcla con agitador	20,000
Reactor enzimático (acero inoxidable)	50,000
Filtro prensa	35,000
Tanque almacenamiento biofertilizante ($\approx 1 \text{ m}^3$)	2,000
Tanque almacenamiento bagazo hidrolizado	3,500
Equipo de llenado y envasado (semi-automático)	5,000
Total equipos	125,500 USD

Nota. Adaptado de ([Peters, 2003](#)). ([Towler, 2022](#)) & ([Turton 2018](#))

Calculando el costo total para instalación de estos equipos

Usando un factor de lang de 4.5 ([Brennan, 2002](#))

Costo totales = 125,500 USD x 4.5 = 562,500USD

7.3 Consideraciones estratégicas para Nicaragua

- **Economía de Escala:** Dada la disponibilidad de BSG en la industria cervecera nicaragüense, la ubicación de la planta debe estar cerca a la fuente de residuo para eliminar costos de transporte y minimizar el riesgo de degradación del bagazo.
- **Automatización:** Invertir en una automatización básica suele tener un retorno rápido al reducir el desperdicio de enzimas y garantizar un producto con calidad constante, vital para la comercialización de biofertilizantes.
- **Enfoque de "Presupuesto Parcial":** Antes de una inversión mayor, se debe realizar pruebas de laboratorio para definir la curva de cinética de reacción con papaína. Esto permitirá calcular con precisión la capacidad del biorreactor requerida, evitando el sobredimensionamiento de equipos.

➤ Para estimar los Costos Operativos en Nicaragua, debemos enfocarnos en los recursos que se consumen en cada lote de producción.

Tabla 6
Costos de materia prima por lote

Insumo	Cantidad	Precio unitario (USD)	Costo (USD)
Agua	0.975 m ³	0.5 USD/m ³	0.49
KOH	3.43 kg	2.0 USD/kg	6.86
Papaína	2 kg	25 USD/kg	50.00
Total materias primas			57.35 USD

Nota Elaboración Propia

Costo de energía: El costo de energía en Nicaragua 0.18USD/kWh para el calentamiento del agua sería:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

- $m = 1100 \text{ kg}$ (mezcla)
- $C_p \approx 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (similar al agua)
- $\Delta T = 60 - 25 = 35 ^\circ\text{C}$

$Q = 161,000 \text{ kJ} = 45 \text{ kWh}$ Energía: $45 \text{ kWh} \times 0.18 \text{ USD/kWh}$
Costo energía = 8.1 USD aproximadamente 9 USD

Costo de mantenimiento: Suponiendo un 4% del costo total de instalación de la planta para obtener el costo anual de mantenimiento

Costo anual = $563.550 \times 0.04 = 21,600 \text{ USD/año}$

Suponiendo que se hacen 300 lotes al año

Costo mant = $21600 / 300 = 72 \text{ USD/lote}$

Tabla 7
Costos directos por lote

Concepto	Costo (USD)
Materias primas	57.35
Energía	9.00
Mano de obra	9.00
Mantenimiento	72.00
Subtotal	147.35 USD

Nota. Elaboración propia

Costos indirectos: Se considera un 20% de los costos directos
Costo indirectos= $0.2 \times 147.35 = 29.47$ USD

OPEX total $C_{total} = 147.35 + 29.47 = 176.82$ USD

Costo de producción: Costo por kg= $176.82.02 / 715.57 = 0.25$ USD

VIII. RESULTADOS

8.1 Determinación de las propiedades fisicoquímicas del bagazo de malta

La caracterización fisicoquímica del bagazo de malta presenta alto potencial como materia prima para la producción de biofertilizante.

Se identificó una composición lignocelulósica constituida principalmente por:

- Celulosa: 15–25%
- Hemicelulosa: 28–35%
- Proteína: 20–26%
- Lignina: 28%

Asimismo, el contenido de nitrógeno total se estimó entre 1.4% lo cual confirma su potencial como fuente de nutrientes agrícolas.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) se presenta en un rango de 10:1 a 18:1 para hidrólisis de bagazo de malta lo que aporta nitrógeno fácilmente disponible bueno para los cultivos y permite una alta biodegradabilidad del material y condiciones favorables para su transformación mediante procesos biotecnológicos (Mussato, 2006 & Kebede, 2020)

El contenido de humedad inicial (75%–80%) confirma la necesidad de un pretratamiento, tal como se estableció en la metodología, para evitar condiciones anaeróbicas y pérdidas de nutrientes.

8.2 Evaluación de la eficiencia de la hidrólisis enzimática

La aplicación de papaína bajo condiciones controladas (pH 6.8, temperatura 60 °C y tiempo de 6 horas) permite la degradación de proteínas del bagazo, liberando aminoácidos y compuestos solubles. Se estimó una eficiencia de solubilización de nitrógeno entre el 35%, lo cual es consistente con procesos de hidrólisis enzimática en biomasa lignocelulósica.

Según las estimaciones en este proyecto se podría lograr obtener una concentración de 1.4% de nitrógeno, valor adecuado dentro de los rangos de bioestimulantes orgánicos. Esto debido a que la hidrólisis enzimática mejora la biodisponibilidad de nutrientes en comparación con métodos tradicionales como el compostaje.

8.3 Evaluación del impacto ambiental

Los resultados indican que la valorización del bagazo de malta mediante hidrólisis enzimática reduce significativamente la carga de residuos agroindustriales. La conversión del bagazo en biofertilizante evita la generación de lixiviados y emisiones de gases asociadas a su disposición inadecuada. El proceso se alinea con la Ley 217 y la NTON 05 014-02, promoviendo el uso sostenible de residuos y la protección del suelo.

Además, el uso del biofertilizante contribuye a:

- Mejorar la microbiota del suelo
- Incrementar la materia orgánica
- Reducir el uso de fertilizantes químicos

8.4 Estimación de costos del proceso

La evaluación económica del proceso de hidrólisis enzimática del bagazo de malta se realizó considerando costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX), con el fin de determinar su viabilidad a escala piloto en condiciones de Nicaragua.

➤ Costos de inversión (CAPEX): El costo total de los equipos principales del proceso se estimó en 125,500 USD, incluyendo molino, tanque de mezcla, reactor enzimático, filtro prensa, tanques de almacenamiento y sistema de llenado.

Para estimar el costo total instalado se utilizó el factor de Lang ($f = 4.5$), obteniéndose un costo total de 562,500USD.

Este valor incluye costos asociados a instalación, tuberías, instrumentación, obra civil y servicios auxiliares.

➤ Costos operativos (OPEX): Los costos operativos se calcularon por lote de producción, considerando el consumo de materias primas, energía, mano de obra y mantenimiento. Siendo el costo directo total es de 147.35 USD/lote.

Los costos indirectos se estimaron como el 20% de los costos directos siendo 29.47USD.

Por lo tanto, el costo operativo total estimado es 176.82USD por lote.

➤ Costo de producción: Considerando una producción de 715.57 kg de biofertilizante por lote, el costo sería 0.25USD por kg de abono orgánico líquido producido.

➤ Consideraciones técnicas: La viabilidad del proceso depende del control de variables críticas como pH, temperatura y dosificación de enzima, las cuales influyen directamente en el rendimiento y en los costos operativos. Asimismo, la localización de la planta cerca de la fuente de bagazo permite reducir costos logísticos y mejorar la estabilidad de la materia prima.

IX. CONCLUSIÓN

La caracterización fisicoquímica del bagazo de malta de cerveza permitió confirmar su elevado potencial como materia prima para la producción de abono orgánico. Los resultados evidenciaron un contenido significativo de materia orgánica y compuestos nitrogenados, así como propiedades compatibles con procesos de transformación biotecnológica. Estas características demuestran que el bagazo de malta es un residuo agroindustrial con alto valor de aprovechamiento, apto para su valorización dentro de sistemas sostenibles de producción de biofertilizantes.

Se determinó que la hidrólisis enzimática aplicada al bagazo de malta constituye un método eficiente para la degradación de la materia orgánica, especialmente de las fracciones proteicas. El uso de papaína como enzima catalítica permitió la liberación de nutrientes solubles, alcanzando una concentración aproximada del 1.4 % de nitrógeno en el biofertilizante líquido. La eficiencia del proceso estuvo estrechamente vinculada al control de variables operativas como pH, temperatura, relación sustrato enzima y agitación, lo que confirma la importancia de una adecuada regulación del proceso para obtener un biofertilizante de alta calidad nutricional.

El análisis del impacto ambiental del abono orgánico producido evidenció que el proceso de valorización del bagazo de malta contribuye positivamente a la prevención de la contaminación y a la conservación del medio ambiente. La aplicación de normativas ambientales demuestra que la transformación de este residuo reduce la carga contaminante asociada a su disposición final, promueve la reutilización de subproductos agroindustriales y se alinea con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

La estimación de los costos de inversión y operación del proceso de hidrólisis enzimática permitió concluir que la viabilidad económica del proyecto depende en gran medida de la optimización de las variables del proceso, particularmente del uso eficiente de la enzima papaína. Para una planta piloto con una capacidad de producción aproximada de 18,500 L/mes, los costos operativos estimados indican que la rentabilidad puede incrementarse mediante la adecuada regulación de las condiciones de operación, la reducción de desperdicios enzimáticos y la localización estratégica de la planta cerca de las fuentes generadoras de bagazo.

X. RECOMENDACIONES

Con base en los objetivos planteados y en los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar el proceso de obtención de abono orgánico a partir del bagazo de malta de cerveza:

1. Profundizar la caracterización fisicoquímica del bagazo de malta, incorporando análisis complementarios como fraccionamiento de la materia orgánica, contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, así como la variabilidad del residuo según el tipo de cerveza producida. Esto permitirá una mejor estandarización del sustrato y un mayor control del proceso productivo.
2. Realizar estudios experimentales a escala piloto y semipiloto que permitan validar los rendimientos teóricos de solubilización del nitrógeno obtenidos en laboratorio, así como optimizar las condiciones operativas de la hidrólisis enzimática, tales como pH, temperatura, tiempo de reacción, relación sustrato enzima y sistemas de agitación.
3. Evaluar la combinación de papaína con enzimas celulolíticas y hemicelulolíticas, con el objetivo de incrementar la degradación de la fracción lignocelulósica del bagazo y mejorar la liberación de nutrientes estructurales, lo que podría aumentar el valor nutricional y la eficiencia agronómica del biofertilizante.
4. Implementar ensayos agronómicos en campo, con diferentes cultivos y tipos de suelo, para determinar el efecto real del biofertilizante líquido sobre el crecimiento vegetal, el rendimiento agrícola, la absorción de nutrientes y la recuperación de suelos degradados, garantizando así su eficacia práctica y aceptación en el sector agrícola.
5. Fortalecer la evaluación del impacto ambiental del proceso, aplicando herramientas complementarias como análisis de ciclo de vida (ACV) y balances de masa y energía, a fin de cuantificar de manera más precisa los beneficios ambientales asociados a la valorización del bagazo de malta y su contribución a la reducción de la contaminación.
6. Desarrollar un análisis financiero más detallado, que incluya indicadores como flujo de caja, valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y período de recuperación de la inversión, permitiendo evaluar la factibilidad económica y la escalabilidad industrial del proceso de hidrólisis enzimática.
7. Estudiar la estabilidad microbiológica y la vida útil del biofertilizante líquido, considerando variables de almacenamiento, conservación y posibles tratamientos de estabilización, con el fin de garantizar la calidad del producto final conforme a la normativa técnica y sanitaria nacional.
8. Fomentar alianzas estratégicas entre la industria cervecera, instituciones académicas y el sector agrícola, promoviendo modelos de economía circular que integren la gestión sostenible de residuos agroindustriales, el desarrollo tecnológico local y el fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles.

XI. BIBLIOGRAFIA

Compañía cervecera de Nicaragua (2016) *sostenibilidad*.
<https://www.ccn.com.ni/sostenibilidad/ambiental/residuos/>

Universidad Nacional Agraria. (s.f.). *Producción de abonos orgánicos mediante compostaje y vermicompostaje en Nicaragua*. Repositorio Institucional UNA.

Asamblea Nacional de Nicaragua. (1996). *Ley No. 217: Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales*. Recuperado de <http://legislacion.asamblea.gob.ni>

Asamblea Nacional de Nicaragua. (2010). *Ley No. 755: Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Recuperado de <http://legislacion.asamblea.gob.ni>

Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). (s.f.). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Managua, Nicaragua.

Legislacion de Nicaragua (2002). NTON 05 014-02 *Norma técnica ambiental para el manejo, tratamiento y disposición final de los desechos sólidos no-peligrosos*. Managua, Nicaragua.
<http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/9e314815a08d4a6206257265005d21f9/3d7b0c9bf4c186790625764e005d16f4?OpenDocument>

Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1–14.

Lynch, K. M., Steffen, E. J., & Arendt, E. K. (2016). Brewers' spent grain: A review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(4), 553–568.

Treimo J., Ivar S., Vincen G., Horn S., (2008) *Enzymatic Solubilization of Proteins in Brewer's Spent Grain*. *Journal of agricultural and food chemistry*.

Yugcha A., Kure J., Castillo P. (s.f.) *Estudio del proceso de secado del latex de papaya (Carica papaya L) Deshidratado por aspersion*. Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil Ecuador.

Balcázar J., Victoria A., (2012) *obtención de papaína a partir del látex de la carga papaya por medio de un sistema de dos fases acuosas*. Escuela de ingeniería química santiago de Cali

Rivera, R. S., Oliva, S. M., & Tineo, D. (2023). *Extracción y purificación de papaína obtenida a partir de tres especies nativas del género Vasconcellea*. *Revista De Investigaciones Altoandinas*, 25(2), 109–116. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.447>

Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., & Soccol, V. T. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residues. *Bioresource Technology*, 74(1), 69–80.

Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11.

Lalić, D., et al. (2025). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Journal of Cleaner Production*.

Alonso Riaño, P. (2022). Valorización del bagazo de cerveza mediante procesos biotecnológicos. Universidad de Burgos.

Bernal-Ruiz, M. (2021). Aprovechamiento del bagazo cervecero mediante hidrólisis enzimática. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 23(2), 45–55.

FAO. (2019). Guía para la producción y uso de abonos orgánicos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Mainardis, M. (2024). Lifting craft breweries sustainability through spent grain valorization. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136996.

Himmel, M. E., Ding, S. Y., Johnson, D. K., Adney, W. S., Nimlos, M. R., Brady, J. W., & Foust, T. D. (2018). Biomass recalcitrance. *Science*, 315(5813), 804–807.

Lech M. (2022, 05 27). *Métodos para el tratamiento del bagazo de cerveza destinado a la recuperación de los valiosos ingredientes que contiene y a la gestión integral de sus residuos*. Sciencedirect.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876222002581>

Wagner, E., Pería, M. E., Ortiz, G. E., & Rojas, N. L. (2021). Revalorización del bagazo cervecero mediante hidrólisis enzimática. *Revista de Ingeniería Química*, 34(2), 89–101.

Castilla J., Cermeño M., Tuohy M., (2023) *Brewers' spent grain pretreatment optimisation to enhance enzymatic hydrolysis of whole slurry and resuspended pellet*. School of Biological and Chemical Science. <file:///C:/Users/User/Downloads/fceng-05-1272988.pdf>

Wang, W., et al. (2021). *Mild urea/KOH pretreatment to enhance enzymatic hydrolysis and recycle liquid waste as fertilizer*. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125392>

Roxia. (s.f.) *contenido de humedad de la torta de la prensa de filtro*. Tecnologías ambientales. Finlandia. https://roxia.com/how-does-a-filter-press-reduce-waste-disposal-costs/?utm_source=chatgpt.com

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.

Nyhan, L. (2023). *Brewers' spent grain: Opportunities for bioprocessing*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(15), 5678–5

Nigam, P. S. (2017). *An overview: Recycling of solid barley waste generated as a by-product in distillery and brewery*. *Waste Management*, 62, 255–261

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill.

Brennan D., Golonka K., (2002) New factors for capital cost estimation in evolving process designs. Institution of Chemical Engineers. Melbourne, Australi.
<https://doi.org/10.1205/026387602760312773>

Towler, G., & Sinnott, R. (2022). *Chemical engineering design* (3rd ed.). Elsevier.

Turton, R., Bailie, R., Whiting, W., & Shaeiwitz, J. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (5th ed.). Pearson.

Kebede, Y. (2020). *Analysis of the physico-chemical characteristics of brewers' spent grain (BSG)*. Journal of Natural Sciences Research, *11*(18), 9–13.

XII. ANEXOS



Figura 1. Extracción del látex de papaya

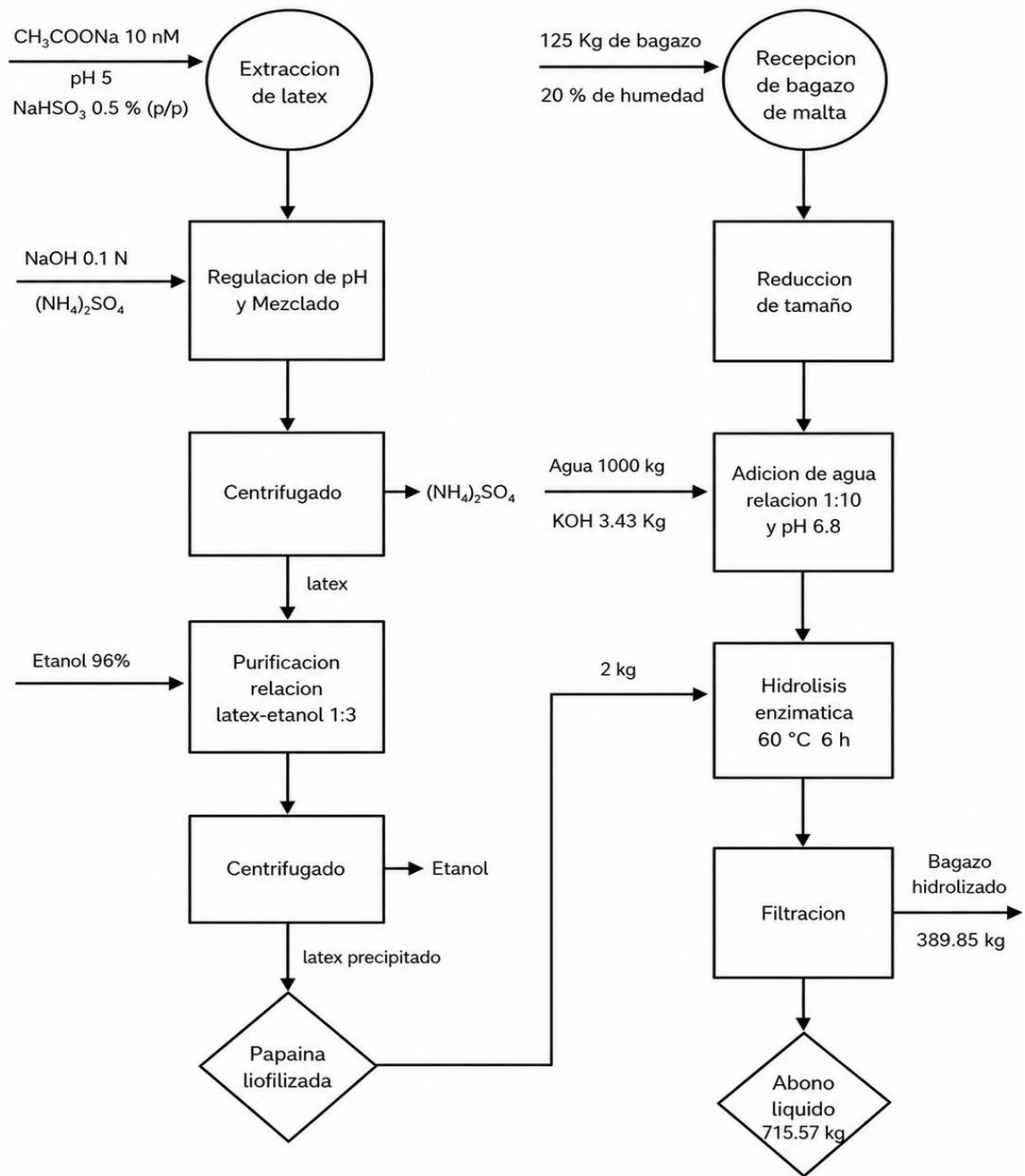


Figura 2, Diagrama de bloque sobre la obtención de papaína y el proceso de hidrolisis enzimática de bagazo de malta para la producción de abono orgánico.

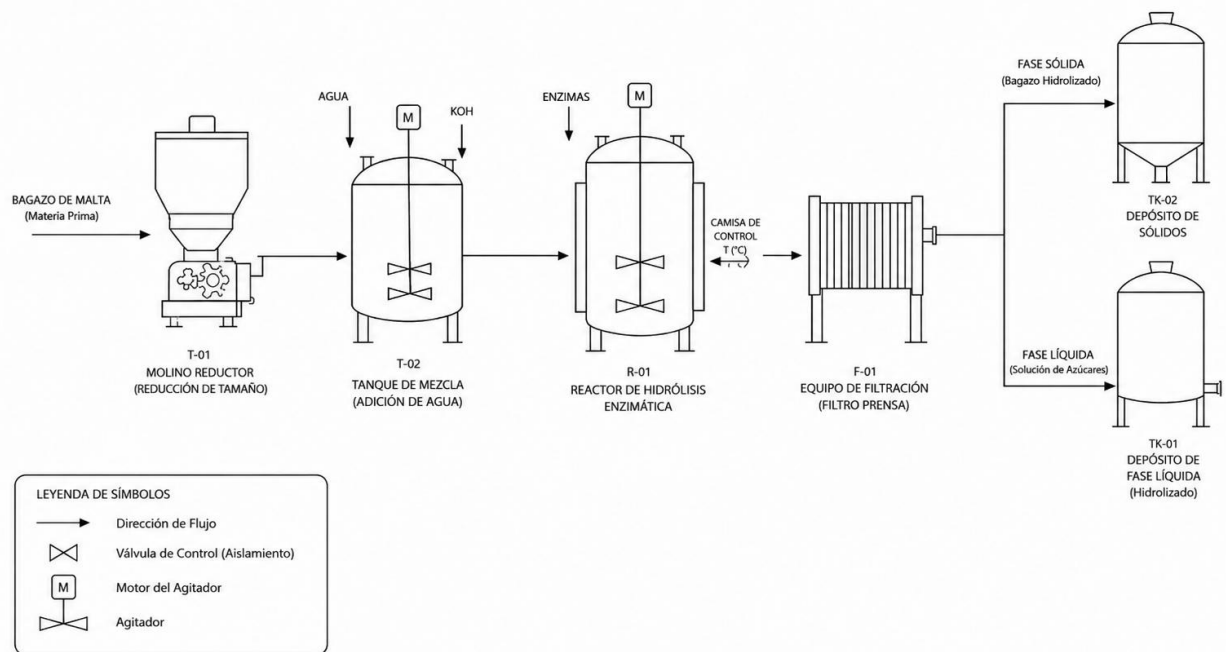


Figura 3. Diagrama de flujo sobre la producción de abono orgánico a través de hidrólisis enzimática del bagazo de malta de cerveza utilizando papaína.