



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE ALIMENTOS

**Sacarificación enzimática de la holocelulosa presente en el raquis del
banano para obtener azúcares fermentables.**

**DUARTE CASTILLO EVELYN ALEJANDRA
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**HERRERA MANTUANO NICOLE EVELYN
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE ALIMENTOS

**Sacarificación enzimática de la holocelulosa presente en el raquis
del banano para obtener azúcares fermentables.**

**DUARTE CASTILLO EVELYN ALEJANDRA
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**HERRERA MANTUANO NICOLE EVELYN
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE ALIMENTOS

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**Sacarificación enzimática de la holocelulosa presente en el raquis
del banano para obtener azúcares fermentables.**

**DUARTE CASTILLO EVELYN ALEJANDRA
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**HERRERA MANTUANO NICOLE EVELYN
INGENIERA EN ALIMENTOS**

VIVANCO CARPIO ERIK RICARDO

**MACHALA
2024**



Trabajo final de titulación. DUARTE-HERRERA

7%
Textos
sospechosos



2% Similitudes
0% similitudes entre
comillas
0% entre las fuentes
mencionadas
5% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Trabajo final de titulación. DUARTE-HERRERA.docx
ID del documento: a09be489369ef957c03be91b434bee6c54745300
Tamaño del documento original: 1,44 MB
Autores: []

Depositante: ERIK RICARDO VIVANCO CARPIO
Fecha de depósito: 15/2/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 15/2/2025

Número de palabras: 11.540
Número de caracteres: 75.399

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	pdfs.semanticscholar.org 6 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (207 palabras)
2	repositorio.utmachala.edu.ec 3 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (63 palabras)
3	repositorio.utmachala.edu.ec Producción de etanol a partir del mucílago de caca... 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (58 palabras)
4	Daniel Correa_Nicole Rivera_Obtencion de hidrogel de grado alimenticio... #514c35 El documento proviene de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (51 palabras)
5	www.scielo.org.pe 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.utc.edu.ec "Producción de humus de lombriz mediante el aprovecham... Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
2	repositorio.utmachala.edu.ec Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
3	dx.doi.org Estrategias de sostenibles ambiental en los emprendimientos agropecua... Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
4	Documento de otro usuario #03922a El documento proviene de otro grupo Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)
5	eprints.ucm.es Estudio y formulación de nuevos cócteles enzimáticos para la mejo... Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Las que suscriben, DUARTE CASTILLO EVELYN ALEJANDRA y HERRERA MANTUANO NICOLE EVELYN, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado Sacarificación enzimática de la holocelulosa presente en el raquis del banano para obtener azúcares fermentables., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

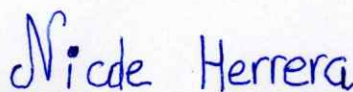
Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



DUARTE CASTILLO EVELYN ALEJANDRA

1104116072



HERRERA MANTUANO NICOLE EVELYN

0955085865

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres; Cesar Alejandro Duarte Serrano y Amelia María Castillo Espinoza, mis mejores amigos, mi todo, ellos han hecho posible que a pesar de muchas circunstancias pueda cumplir esta meta que me propuse.

A mi hermana, Betzabé una niña con capacidades especiales que con su sonrisa hace que mis días sean más llevaderos ya que gracias a su forma única de ver la vida y su amor incondicional me enseña ser mejor.

A mis hermanos Gonzalo Francisco Zambrano Castillo y Bryan Adrián Duarte Castillo con sus respectivas esposas por haberme brindado su apoyo moral durante el transcurso de mi vida académica y personal. A mis sobrinos Tiffany, Randy y Nicolas que con su inocencia me motivaron a no claudicar en este sueño que hoy lo estoy alcanzando.

Y porque no dedicarle este trabajo, a mi mascota Lucky, el gatito que con sus ocurrencias me acompañó durante las largas noches de estudio.

Evelyn Alejandra Duarte Castillo

Dedico esta tesis a Dios, fuente suprema de sabiduría y fortaleza, por guiar cada uno de mis pasos, iluminar mi mente en los momentos de duda y bendecirme con la capacidad y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta académica.

A mi madre Mercedes Mantuano, quien con su inquebrantable fortaleza y amor incondicional ha sido el faro que ha iluminado cada paso de mi camino académico. A mi padre Aquiles Herrera, por enseñarme que la perseverancia y la dedicación son las llaves maestras del éxito.

A mis queridos hermanos y hermanas en especial a Darío Herrera y Joffre Herrera, por ser mis cómplices eternos en este viaje llamado vida, por su apoyo constante y por inspirarme a ser mejor cada día.

Nicole Evelyn Herrera Mantuano

AGRADECIMIENTO

Al ser Omnipotente, Omnipresente, Omnisciente, al Dios del cielo y de la tierra que con su infinito amor y misericordia permitió que llegue a este momento de mi vida, segura estoy que de su mano alcanzaré nuevos éxitos.

A mis padres por su infinito amor, paciencia y esfuerzo, pilares fundamentales de mi vida que con su sabiduría han podido guiarme con sus buenos consejos.

A nuestra Universidad Técnica de Machala y sus docentes que a lo largo de todos estos años que duro mi preparación, me brindaron sus sabias enseñanzas, sin ustedes no hubiese sido posible este triunfo

A mis tutores de tesis que con paciencia y esmero estuvieron siempre prestos a brindarme su apoyo y guía y porque no agradecer al personal administrativa de la Universidad Técnica de Machala, que han tenido la amabilidad de brindarme su ayuda durante este proceso de Titulación.

Evelyn Alejandra Duarte Castillo

Con inmensa alegría quiero agradecer a quienes han sido parte vital de este logro académico.

A mis maestros, por ir más allá de las lecciones en el aula y sembrar en mí la curiosidad y el pensamiento crítico. Su orientación ha sido la brújula que guió mi camino académico.

A mis compañeros de carrera, por convertir cada reto en una oportunidad de aprendizaje colectivo. Las experiencias compartidas han enriquecido mi formación de maneras que los libros no podrían.

A Mario Córdoba, compañero de vida que ha compartido conmigo cada momento de este desafiante proceso, por tu paciencia infinita, tu comprensión y por ser mi refugio en los momentos más difíciles de este camino académico.

Y con todo mi corazón, a mi familia: su amor y respaldo han sido mi refugio y mi impulso. En los momentos de duda, su confianza me dio la fuerza para continuar. Este título lleva consigo la huella de cada uno de ustedes.

Nicole Evelyn Herrera Mantuano

RESUMEN

La presente investigación analiza el aprovechamiento del raquis de banano como materia prima para la obtención de azúcares fermentables mediante tratamientos físico-químicos y sacarificación enzimática. La producción de banano genera una gran cantidad de residuos agroindustriales, esta materia prima antes mencionada representa un subproducto con alto contenido de compuestos lignocelulósicos, lo que lo convierte en una opción viable para la producción de subproductos como lo son azúcares fermentables.

El problema central radica en el raquis, este es un residuo agroindustrial poco aprovechado, acumulándose en plantaciones y centros de producción sin una previa gestión adecuada. Esto representa un desafío ambiental y económico, pero también una oportunidad para la valorización de estos residuos mediante procesos biotecnológicos. Sin embargo, el alto contenido de la estructura lignocelulósica dificulta la conversión eficiente de sus componentes en azúcares fermentables. Para superar esta barrera, se aplicaron distintos tratamientos, seguidos de hidrólisis enzimática con *Trichoderma reesei*, un hongo ampliamente utilizado en la degradación de la pared lignocelulósica. La aplicación de pretratamientos adecuados es clave para optimizar la conversión de biomasa lignocelulósica en azúcares.

Este estudio contribuye a la valorización de residuos agrícolas y al desarrollo de procesos sostenibles en la industria agroindustrial; los resultados mostraron que el tratamiento electrolisis presentó la mayor eficiencia en la hidrólisis enzimática, reduciendo la recalcitrancia del raquis y mejorando la accesibilidad de las enzimas. El análisis estadístico (ANOVA) confirmó diferencias significativas en la eficiencia de los tratamientos. Se concluyó que el raquis de banano tiene un alto potencial para la producción de azúcares fermentables.

Palabras clave: Raquis de banano, biomasa lignocelulósica, sacarificación enzimática, pretratamiento, azúcares fermentables, bioproductos

ABSTRACT

This research analyses the use of banana rachis as a raw material to obtain fermentable sugars by means of physical-chemical treatments and enzymatic saccharification. Banana production generates a large amount of agro-industrial waste, this raw material represents a by-product with a high content of lignocellulosic compounds, which makes it a viable option for the production of by-products such as fermentable sugars.

The main problem lies in the rachis, which is an agro-industrial waste that is little used, accumulating in plantations and production centres without adequate management. This represents an environmental and economic challenge, but also an opportunity for the valorisation of this waste through biotechnological processes. However, the high content of the lignocellulosic structure hinders the efficient conversion of its components into fermentable sugars. To overcome this barrier, different treatments were applied, followed by enzymatic hydrolysis with *Trichoderma reesei*, a fungus widely used in lignocellulosic wall degradation. The application of appropriate pre-treatments is key to optimise the conversion of lignocellulosic biomass into sugars.

This study contributes to the valorisation of agricultural waste and the development of sustainable processes in the agro-industrial industry; the results showed that the electrolysis treatment presented the highest efficiency in enzymatic hydrolysis, reducing the recalcitrance of the rachis and improving the accessibility of the enzymes. Statistical analysis (ANOVA) confirmed significant differences in the efficiency of the treatments. It was concluded that banana rachis has a high potential for the production of fermentable sugars.

Keywords: Banana rachis, lignocellulosic biomass, enzymatic saccharification, pretreatment, fermentable sugars, bioproducts.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
JUSTIFICACIÓN	15
PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS	16
OBJETIVOS	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
MARCO TEÓRICO	18
1.1 Banano	18
1.1.1 Morfología	18
1.1.2 El cultivo en Ecuador	19
1.1.3 Racimo	20
1.1.4 Raquis	21
1.2 Sacarificación de residuos lignocelulósicos	23
1.2.1 Celulosa	24
1.2.2 Hemicelulosa	24
1.2.3 Cenizas	24
1.2.4 Humedad	25
1.2.5 Lignina	25
1.3 Sacarificación enzimática	25
1.3.1 Fosfato de amonio monobásico	26
1.3.2 <i>Trichoderma spp</i>	26
1.4 Azúcares fermentables	27
1.4.1 Espectrometría UV visible	28
1.5 Tratamientos	28
1.5.1 Tratamiento de Electrólisis	29
1.5.2 Tratamiento térmico	29
1.5.3 Tratamiento Alcalino	29
METODOLOGIA	29
2.1 Lugar de la investigación	29

2.2 Acondicionamiento de la muestra.	30
2.3 Reactivos	30
2.4 Diseño de experimento	30
2.4.1 Definición de variables	30
2.4.2 Obtención de la muestra	31
2.4.3 Tratamientos	32
2.4.4 Hidrolisis enzimática	32
2.5 Caracterización del raquis de banano	34
2.5.1 Determinación de pH	34
2.5.2 Humedad	34
2.5.3 Determinación de cenizas	35
2.5.4 Lignina	35
2.5.5 Celulosa	36
2.5.5 Extraíbles	36
2.5.6 Holocelulosa	37
Determinación de glucosa	37
2.6 Caracterización de los tratamientos (alcalino, electrólisis y térmico)	39
2.6.3 Azúcares reductores	40
2.7 Análisis Estadísticos	40
<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	40
3.1 Caracterización fisicoquímica del raquis de banano	40
3.2 Evaluación del pH en la producción de azúcares fermentables	42
3.3. Comportamiento de la celulosa en la producción de azúcares fermentables.	46
3.4. Producción de azúcares fermentables en raquis de banano	49
<i>CONCLUSIÓN</i>	54
<i>RECOMENDACIONES</i>	55
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología del banano _____	18
Figura 2. Porcentaje de participación en la superficie cosechada de banano 2023 ____	19
Figura 3. Producción de banano 2022- 2023 (En millones de Tm)_____	20
Figura 4. Desechos de banano por cada planta de banano: BR, BPS y BP _____	22
Figura 5. Diagrama de flujo para la obtención de raquis de banano en polvo. _____	31
Figura 6. Diagrama de flujo para la hidrólisis enzimática. _____	33
Figura 7. Curva de calibración con solución patrón para las muestras de raquis. _____	38
Figura 8. Curva de calibración con solución patrón para las muestras de raquis. _____	39

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento. _____	42
Grafica 2. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada tratamiento. _____	43
Grafica 3. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento. _____	44
Grafica 4. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento. _____	44
Grafica 5. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento. _____	46
Grafica 6. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada tratamiento. _____	46
Grafica 7. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento. _____	47
Grafica 8. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento. _____	48
Grafica 9. Comportamiento de azúcares fermentables de raquis de banano mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento _____	49
Grafica 10. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada pretratamiento. _____	50
Grafica 11. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento. _____	51
Grafica 12. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento. _____	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles nutricionales y materia seca en las partes del racimo de banano _____	23
Tabla 2. Composición Química de los residuos del banano en base seca. _____	23
Tabla 3. Diseño experimental _____	30
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del raquis de banano. _____	41
Tabla 5. Comportamiento del pH en la producción de azúcares fermentables en cada tratamiento durante 72 horas para cada tratamiento con inóculo de <i>Trichoderma</i> spp. _____	45
Tabla 6. Celulosa de raquis de banano y comportamiento mediante hidrólisis enzimática a través del tiempo (0, 24, 48 y 72 horas) para cada tratamiento con inóculo de <i>Trichoderma</i> spp. ____	49
Tabla 7. Azúcares fermentables de raquis de banano y comportamiento mediante hidrólisis enzimática a través del tiempo (0, 24, 48 y 72 horas) para cada tratamiento con inóculo de <i>Trichoderma</i> spp. _____	52

INTRODUCCIÓN

El banano, cultivado en más de 130 países, es la segunda fruta más producida a nivel mundial después de los cítricos, representando el 16 % de la producción frutícola. Además, se posiciona como el cuarto cultivo alimentario más relevante tras el arroz, el trigo y el maíz (Alzate Acevedo, Díaz Carrillo, Flórez López, & Grande Tovar, 2021).

Su producción no solo impulsa el desarrollo económico de diversas naciones, sino que también crea múltiples oportunidades laborales en el sector agrícola, en la exportación y en la elaboración de subproductos industriales como mermeladas, bebidas alcohólicas y harinas (Aguilar Espinoza & Marin Cuenca, 2023). La industria bananera genera grandes volúmenes de residuos, como raquis, pseudotallos, hojas y cáscaras, que pueden ser reutilizados en embalajes y bioplásticos, promoviendo así la economía circular (García Batista, Quevedo Guerrero, & Socorro Castro, 2020).

Dentro de estos subproductos, el raquis de banano destaca por su peso promedio de 8 a 10 kg y su alto contenido de compuestos lignocelulósicos, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones industriales (Espinach, y otros, 2024).

Sin embargo, el manejo inadecuado de estos residuos puede generar importantes problemas ambientales. En la industria bananera, los desechos lignocelulósicos, como pseudotallos, hojas y raquis, constituyen aproximadamente el 54,3 % de la biomasa generada, mientras que solo el 11,16 % se destina a la exportación del fruto y sus derivados. En Ecuador, particularmente en la provincia de El Oro, se producen anualmente alrededor de 198.602 Tn de residuos agroindustriales lignocelulósicos. Por cada tonelada de banano cosechado, se rechazan 100 kg de fruta y se generan aproximadamente cuatro Tn de residuos, que incluyen pseudotallos 3 Tn, tallos 160 kg, hojas 480 kg y cáscaras 440 kg (Ferrer Gutiérrez, Marcheno Revilla, Blacio Toro, & Vera Infante, 2020).

Estos residuos, que contienen una elevada concentración de lignina, celulosa y hemicelulosa, son adecuados para diversas aplicaciones biotecnológicas. Uno de los principales usos potenciales de estos subproductos es la obtención de azúcares fermentables, que actúan como sustratos esenciales en procesos de fermentación industrial (Lima, Karimian, Johnston, & Hartley, 2024). La transformación de estos compuestos mejora las propiedades organolépticas de los alimentos, prolonga su vida útil y genera productos de mayor valor agregado. Para lograr este aprovechamiento, es necesario aplicar tratamientos físico-químicos y biológicos que degraden los

polisacáridos de la pared celular del raquis, facilitando la liberación de azúcares simples como glucosa, arabinosa, xilosa y fructosa (Moreira Morales & Solorzano Vanegas, 2020).

La estructura lignocelulósica del raquis, que combina celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta alta recalcitrancia, lo que dificulta su hidrólisis enzimática en azúcares reductores. Por lo tanto, es fundamental emplear un tratamiento que modifique sus barreras estructurales y mejore la accesibilidad a las enzimas y microorganismos durante los procesos de hidrólisis y fermentación (Sun & Cao, 2016). En este sentido, el uso del hongo *Trichoderma reesei* ha mostrado ser altamente efectivo en la producción de enzimas celulolíticas mediante fermentación. Estas enzimas, tanto endógenas como exógenas, facilitan la sacarificación de los compuestos lignocelulósicos presentes en el raquis, transformándolos en azúcares fermentables. Además, el uso de tratamientos específicos como la hidrólisis enzimática y la adición de nutrientes complementarios (fosfato de amonio monobásico) optimiza este proceso, permitiendo la obtención de productos como jarabes azucarados y prebióticos (Khalaf Al-Saidi, y otros, 2024).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el potencial del raquis de banano como materia prima para la obtención de azúcares fermentables mediante pretratamientos físico-químicos y la posterior sacarificación enzimática, contribuyendo así al aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales y a la generación de productos de alto valor agregado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de banano genera grandes volúmenes de desechos, siendo el raquis uno de los principales residuos descartados tras la cosecha. Este material, compuesto mayormente por celulosa y hemicelulosa, representa una fuente potencial de biomasa para la obtención de azúcares fermentables, lo que podría contribuir a su valorización y aprovechamiento en la producción de biocombustibles y otros productos de interés industrial (Carranza Saavedra, Alvarado Núñez, Méndez Reyes, Valenzuela Real, & Solanilla Duque, 2015).

Los residuos agroindustriales, en su mayoría biomasa lignocelulósica, han cobrado relevancia en los últimos años debido a su carácter renovable, alta disponibilidad, bajo costo, biodegradabilidad y propiedades mecánicas y térmicas favorables (Cardoso Araújo, Machado, & Guerra Vilarinho, 2019). Sin embargo, el aprovechamiento de estos materiales enfrenta desafíos técnicos significativos. Esta biomasa está conformada por una matriz de lignina, celulosa y hemicelulosa, entrelazadas mediante interacciones no covalentes y enlaces cruzados covalentes, lo que dificulta su hidrólisis y conversión en productos de valor agregado (Sartori, y otros, 2015). La lignina en el raquis de banano actúa como una barrera que dificulta el acceso de las enzimas a la celulosa, reduciendo la eficiencia de la sacarificación enzimática. Para superar esta limitación, se requieren tratamientos físicos, químicos, biológicos o combinados, que permitan degradar la lignina y mejorar la accesibilidad de la celulosa para su conversión en azúcares fermentables. No obstante, la transformación de la celulosa y hemicelulosa del raquis en azúcares fermentables enfrenta dificultades adicionales, ya que estos compuestos se encuentran en formas altamente estructuradas, lo que restringe la eficiencia de la acción enzimática (Guarnizo Franco & Martínez Yepes, 2011). Además, factores como el pH, la temperatura y las condiciones ambientales influyen en la actividad de enzimas como la celulasa y la hemicelulasa, por lo que es fundamental optimizar estos parámetros para mejorar el rendimiento del proceso. A su vez, la viabilidad económica del proceso depende del costo de adquisición de las enzimas y de los tratamientos previos requeridos para mejorar el acceso a la biomasa (Leu Yuan & Zhu, 2012).

Finalmente, los azúcares obtenidos del raquis de banano deben ser fermentados por microorganismos específicos para la producción de biocombustibles. Es necesario evaluar la factibilidad de estos azúcares en procesos de fermentación y considerar los posibles impactos ambientales asociados, como el consumo de agua y la generación de

subproductos no deseados (Guarnizo Franco & Martínez Yepes, 2011). Dado el potencial de aprovechamiento del raquis de banano, resulta fundamental investigar estrategias eficientes para su transformación en productos de valor agregado, garantizando tanto su viabilidad técnica como su sostenibilidad ambiental y económica.

JUSTIFICACIÓN

La conversión de biomasa de residuos orgánicos en azúcares fermentables constituye una alternativa clave para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar el uso de biocombustibles, lo que, a su vez, contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve prácticas agrícolas más sostenibles (Vargas Corredor & Pérez, 2018). Este enfoque se ve respaldado por las biotecnologías emergentes, que permiten la producción económica y sostenible de recursos de alto valor añadido. Estas biotecnologías utilizan microorganismos capaces de degradar y transformar los azúcares de biomasa lignocelulósica, tales como cáscaras de frutas, residuos orgánicos y raquis de banano (Fan & Xia, 2015). El uso de biomasa lignocelulósica para la producción de azúcares fermentables es de gran interés actualmente, ya que este proceso permite obtener compuestos comerciales de alto valor, como bioetanol, biobutanol, ácido láctico, xilitol y proteína unicelular (Gonzales Calva & Zuma Lalangui, 2021). A nivel mundial, la producción de banano genera alrededor de 70 millones de toneladas anuales, lo que puede resultar en 25-30 millones de toneladas de residuos, incluyendo los raquis. Si se gestionan adecuadamente, estos residuos pueden utilizarse para compost, biocombustibles o como alimento animal, lo que contribuye al aprovechamiento sostenible de la biomasa (Lizarraga Alvarez, Haro Dominguez, & Cordova Valles, 2020). La sacarificación enzimática del raquis de banano representa una solución eficiente que no solo aborda el desperdicio agrícola, sino que también promueve la sostenibilidad, la innovación y el desarrollo económico en áreas rurales (Calle Castro & Tufiño Bejarano, 2024). Este proceso permite obtener azúcares fermentables a partir de fuentes no convencionales, diversificando las materias primas para la producción de biocombustibles y otros productos químicos. Además, la investigación enfocada en la mejora de la eficiencia de las enzimas y las condiciones óptimas para este proceso contribuirá al avance de la biotecnología, favoreciendo el desarrollo de nuevas tecnologías (Cajo Guerrero & Vásquez Ramos, 2017).

PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

Hipótesis de investigación: Mediante la sacarificación enzimática del raquis de banano, es posible obtener una concentración significativa de azúcares fermentables.

Hipótesis nula: Mediante la sacarificación enzimática del raquis de banano, no es posible obtener una concentración significativa de azúcares fermentables.

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener azúcares fermentables a partir de la holocelulosa presente en el raquis de banano mediante un proceso de sacarificación enzimática, con el fin de valorizar este subproducto agrícola en la producción de bioproductos sostenibles.

Objetivos específicos

- Caracterizar el raquis de banano a través humedad, cenizas, lignina, celulosa y hemicelulosa para conocer la cantidad de azúcares fermentables que se pueden obtener.
- Aplicar mediante el tratamiento de electrólisis, térmico y alcalino al raquis de banano para mejorar la hidrólisis enzimática.
- Evaluar el comportamiento de pH, celulosa y azúcares fermentables en los tratamientos alcalino, térmico y electrolisis durante 72 horas.
- Cuantificar los azúcares fermentables producidos en la hidrólisis enzimática, mediante espectrofotometría UV-Visible.

MARCO TEÓRICO

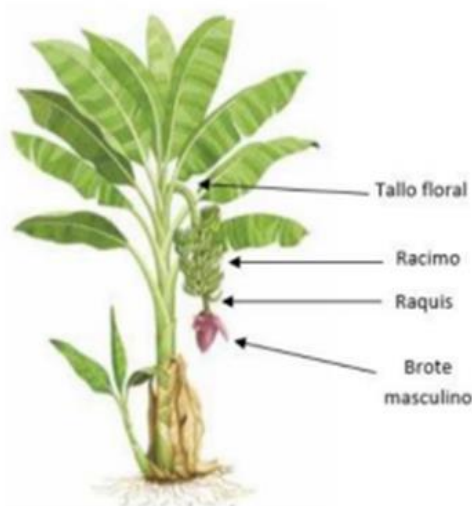
1.1 Banano

Las diversas especies de banano y del género (*Musa spp.*) provienen del sur de Asia aproximadamente en el 650 D.C. comenzó su cultivo en el Mediterráneo y desde el siglo XV se trasladó a las Islas Canarias, lugar desde el cual fue transportado a América durante la colonización española (Vásquez Orozco, 2017). En la actualidad, se produce en América Central y Sudamericana, África y Asia. Los países de América Latina que generan la mayor cantidad de banano para exportar, aproximadamente 10 millones de Tn al año, representando el 90 % de la producción global (Larenas, 2018).

1.1.1 Morfología

Las diversas especies de (*Musa spp.*), son grandes plantas herbáceas que no poseen un tallo auténtico y poseen un rizoma de tamaño reducido. Según la especie y la variedad, puede llegar a tener una altura de entre 3,5 y 7,5 m. El tallo aparente (pseudotallo) surge de la unión de vainas foliares con formas cónicas, que concluyen en una corona de hojas. El bulbo, también conocido como rizoma, es en sí mismo un extenso tallo subterráneo con múltiples meristemos coronados de yemas que, una vez desarrolladas, darán lugar a inflorescencias. Posee raíces superficiales que raramente exceden los 40 cm de profundidad; la mayoría de ellas se concentran alrededor de los 17 cm (Galán, y otros, 2018).

Figura 1. Morfología del banano



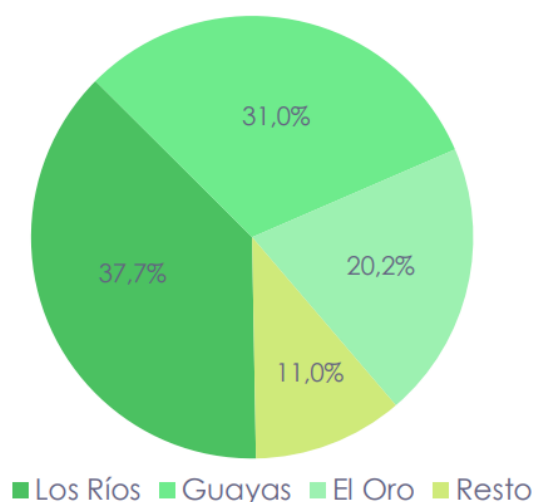
Fuente: (Galán, y otros, 2018)

El sistema radicular se compone de raíces que al principio son blandas y blancas, pero que luego se transformarán en amarillas y duras, llegando a tener hasta 3 m de longitud lateral y 1,5 m de profundidad. Las hojas surgen del meristemo terminal, ubicado en el nivel más alto del rizoma, y surgen del interior del pseudostem, enrollándose como un puro. Se distinguen por sus grandes dimensiones, que oscilan entre 2 y 4 m de longitud y hasta 1,5 m de anchura, con un pecíolo de 1 m o más de longitud y un limbo alargado. En el período de floración, un racimo suspendido de entre 1 y 2 m de longitud y de 5 a 6 cm de diámetro, emerge de él una veintena de brácteas alargadas, ovaladas, de tonalidad roja púrpura, recubiertas de un polvo blanco (Zhiminaicela Cabrera, Quevedo Guerrero, & García Batista, 2020)

1.1.2 El cultivo en Ecuador

La producción de bananas en Ecuador es una actividad de gran relevancia, y actualmente se encuentra en la segunda posición como exportador de esta fruta a escala global. De acuerdo con información del Instituto de Estadísticas y Censos (INEC), en 2023 se cosecharon 175.181 hectáreas de banano, lo que significó un incremento del 4,6 % en comparación con el año 2022. La mayoría del banano se encuentra en la Región Costa, la Figura 2 indica que tres provincias representan el 89,0 % de la superficie nacional de cosecha de banano, siendo estas: Los Ríos, Guayas y El Oro; en contraste, la región Sierra cuenta con una cuota del 11,0 % (INEC, 2023).

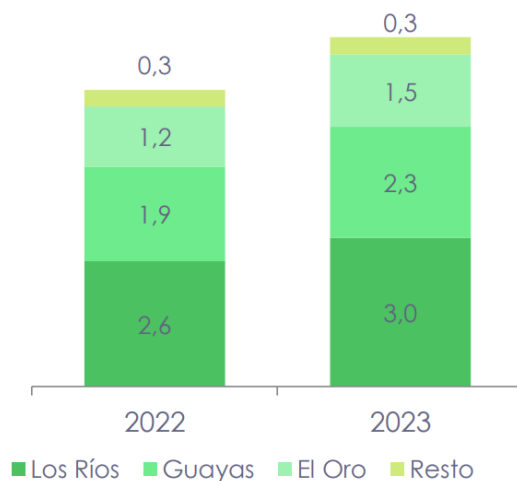
Figura 2. Porcentaje de participación en la superficie cosechada de banano 2023



Fuente: (INEC, 2023)

Como se ilustra en la figura 3, la producción anual de bananas alcanzó los 7,2 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 17,8 % en comparación con el año previo. Los Ríos es la provincia con la mayor producción de bananas en todo el país, representando el 42,6 % de la producción total (INEC, 2023).

Figura 3. Producción de banano 2022- 2023 (En millones de Tm)



Fuente: (INEC, 2023).

Esto implica que la producción de banano representa una significativa fuente laboral con aproximadamente 400 000 oportunidades de empleo, lo que implica que aproximadamente el 12 % de la población económicamente activa se ve favorecido de esta actividad de alguna manera (INEC, 2023).

1.1.3 Racimo

La recolección del racimo de banano para exportación se lleva a cabo teniendo en cuenta su edad fisiológica y el grosor del fruto central de la fila externa de la segunda mano basal. Ambos factores están preestablecidos y determinados principalmente en base al periodo del año y a las características (tamaños) de los frutos acorde al mercado de destino. Para satisfacer estas especificaciones, la supresión de manos auténticas es un hábito habitual en el racimo de banano. Esta tarea se lleva a cabo para satisfacer las demandas de grosor y longitud del fruto empacado, con el objetivo de incrementar la cantidad de frutos con una mejor presentación o calidad (Vásquez Castillo, Racines, Moncayo, Viera, & Seraquive, 2019).

Hay una reducción del peso del racimo a medida que se incrementa la intensidad del desmane. Esta disminución en la masa no se compensa con un aumento en la masa de las

manos restantes. Incrementos en la intensidad de desmane no han causado un aumento en las dimensiones de los frutos residuales, cuando la recolección se lleva a cabo en función de la edad y el grosor del fruto central de la fila exterior de la segunda mano basal (Scribano, Fontana, Luaces, & Cáceres, 2018).

1.1.4 Raquis

Es claro que los procesos de producción agrícola generan residuos, algunas plantaciones contribuyen más, otras menos. No obstante, en este escenario específico, las bananeras, donde el proceso productivo produce desechos durante todo el ciclo de producción, derivados del mantenimiento y la recolección. Destacan el raquis, las hojas y los vástagos. Al hacer los usos más relevantes de estos desechos, podemos disminuir las cargas de contaminación (Vera Rodríguez, y otros, 2021).

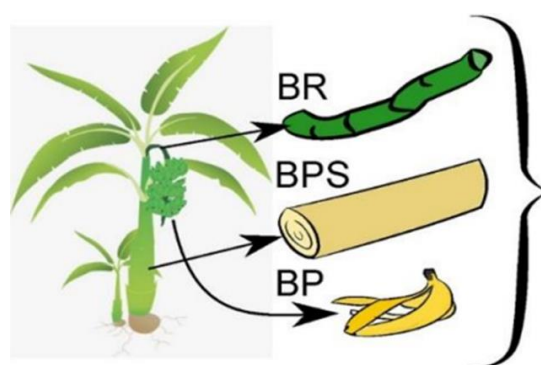
El raquis, junto con otros elementos de la planta del banano, son residuos agroindustriales que se acumulan en los mercados de productos agrícolas de uso específico limitado o inexistente. Algunos de los elementos más utilizados en casa incluyen hojas secas o de color verde, pseudotallo y cáscaras. Los rizomas suelen ser los componentes menos utilizados. Tras la utilización de los frutos, se producen los siguientes subproductos como el tallo floral de la banana, denominado raquis o pinzote, que juega un papel vital al mantener el racimo de banano durante el proceso de la fruta. No obstante, se acumulan en lugares de recolección y mercados de cosecha (Romero Bonilla, Macías Balón, Palacios Moreno, & Redrovan Pesantez, 2019).

1.1.4.1 Uso de raquis

Los usos más frecuentes están relacionados con la producción de compost, como materiales de construcción, en la fabricación de cuerdas para atar pequeños animales y piezas de caza. En pocos lugares las yemas se utilizan como alimento o medicina. Otros usos incluyen la extracción de fibra para la elaboración de obras de arte y artesanía. El valor nutritivo del pseudotallo es alto y podría promoverse como alimento para animales. Por el momento no hay aprovechamiento a gran escala de los subproductos de la industria bananera, enfocado a la producción de materiales de alto valor añadido mediante procesos biotecnológicos en biorrefinería para la obtención de biocombustibles de segunda generación y plásticos biodegradables (Coelho Costa, y otros, 2022).

Los residuos que provienen de la incineración planta de plátano sobresalen como materiales adsorbentes de gran valor, producidos por la generación de banano en volúmenes considerables tras cada cosecha que se lleva a cabo alrededor de la mitad del año, aproximadamente cada 9 meses. Los residuos de banana (BW) abarcan diferentes componentes, tales como el embalaje y la parte exterior, raquis de plátano (BR), el pseudotallo de banano (BPS), la cáscara de banano (BP) y el racimo de banano (BP) y las hojas. Por esta razón, el raquis de banano se destaca como uno de los biosorbentes más potentes y eficientes, sobresaliendo por su destacada habilidad de adsorción. El raquis de banano se destaca como un recurso biológico revolucionario, renovable y sumamente eficaz (Coelho Costa, y otros, 2022).

Figura 4. Desechos de banano por cada planta de banano: BR, BPS y BP



Fuente: (Coelho Costa, y otros, 2022).

1.1.4.2 Producción de raquis y su composición

La producción anual de los distintos tipos de banano cultivados y teniendo en cuenta que el 10 % de esta cantidad corresponde al raquis, se podría estimar que se producen un valor aproximadamente 720 mil Tn anuales de este residuo lignocelulósico (Levanič et al., 2020). En donde la provincia de El Oro representa el 42 % de producción de esta fruta, detallando alrededor de 48 492 han sido sembradas, produciendo alrededor de 198.602 Tn al año de residuo lignocelulósico (Coelho Costa, y otros, 2022).

La Tabla 1 muestra que el raquis alberga un alto nivel de nutrientes en comparación con otras partes del racimo de banano. Según estudios realizados, el raquis de plátano contiene cerca del 61 % de lignina y un 28 % de celulosa, respectivamente (Zhiminaicela Cabrera, Quevedo Guerrero, & García Batista, 2020).

Tabla 1. Niveles nutricionales y materia seca en las partes del racimo de banano

Parte	Materia fresca	Materia Seca		N		P		K		Ca		Mg		S	
		%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g
Pulpa	23,04	25,	5,9	0,7	45,	0,0	5,5	4,7	101,	0,0	0,7	0,1	7,9	0,1	6,
Cascar	15,31	8	1,3	6	3	9	1,9	6,0	2	1	1	3	2	1	3
a	2,87	9,1	1,5	1,2	17,	0,1	0,3	13,4	83,8	0,2	3,8	0,1	2,0	0,0	1,
Raquis		5,5		5	3	4			21,2	8	1	5	9	8	1
				1,6	2,6	0,2				0,2	0,4	0,1	0,2	0,2	0,
				5		1				8	4	8	8	2	3
Total	41,22	18,	7,4	0,8	65,	0,1	7,8	206,	206,	4,9	4,9	0,1	10,	0,1	7,
		2	5	7	2		3	2	2	6	6	4	2		8

Fuente: (Zhiminaicela Cabrera, Quevedo Guerrero, & García Batista, 2020)

1.2 Sacarificación de residuos lignocelulósicos

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por tres polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con pequeñas cantidades de otros componentes como minerales y compuestos fenólicos. La proporción de estos componentes varía ampliamente en función del origen de la biomasa, los factores de cultivo, humedad y otras variables asociadas a sus características genéticas y fenotípicas de la especie vegetal (Zhiminaicela Cabrera, Quevedo Guerrero, & García Batista, 2020). En general, la biomasa lignocelulósica, expresada como material seco, se caracteriza por 30,6 % de celulosa, 15,7 % de hemicelulosa, 10 % de lignina, 23 % de cenizas y 8,7 % de humedad. En la tabla 2 muestran una composición química de estos residuos lignocelulósicos (Prado Cabrera & Ferrer Gutierrez, 2020).

Tabla 2. Composición Química de los residuos del banano en base seca.

Composición	Raquis (%)
Celulosa	30,6
Hemicelulosa	15,7
Cenizas	23
Humedad	8,7
Lignina	9,85

Fuente: (Prado Cabrera & Ferrer Gutierrez, 2020).

Holocelulosa:

Es una mezcla compleja de carbohidratos, formada por celulosa y hemicelulosa, que se encuentra junto con la lignina en la pared celular esta biomasa representa un recurso natural valioso, ya que la holocelulosa puede descomponerse en sus azúcares monoméricos, los cuales pueden ser posteriormente convertidos en etanol (Guarnizo Franco & Martínez Yepes, 2011).

1.2.1 Celulosa

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza y constituye el principal componente estructural de las plantas leñosas y las fibras naturales. Se trata de un polímero natural formado exclusivamente por unidades de β -glucosa unidas mediante enlaces β -1,4-glucosídicos. Su estructura es lineal y fibrosa, lo que permite la formación de numerosos puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de diferentes cadenas de glucosa adyacentes, otorgándole gran resistencia e insolubilidad en agua (Prado Cabrera & Ferrer Gutierrez, 2020).

1.2.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polímero complejo clasificado como un heteropolisacárido, compuesto por diferentes unidades de monosacáridos como pentosas y hexosas. Está formada por diversos azúcares que se agrupan en cadenas más cortas y ramificadas, pero con un peso molecular inferior al de la celulosa. Este polímero se asocia a la celulosa mediante interacciones entre polisacáridos, estas hemicelulosas constituyen el segundo grupo más abundante de polisacáridos en las paredes celulares vegetales, representando aproximadamente el 30-35 % del peso seco de estas estructuras. Aunque son insolubles en agua, se disuelven en medios alcalinos (Palacios, 2016).

1.2.3 Cenizas

Las cenizas, representan los residuos inorgánicos que permanecen tras someter una materia orgánica a un proceso de ignición u oxidación. Es fundamental comprender las características de los métodos analíticos empleados, así como el funcionamiento del equipo utilizado, para garantizar la obtención de resultados precisos y confiables para el uso respectivo (Hoyle Vega & Rodriguez Lopez, 2019).

1.2.4 Humedad

El cultivo de banano requiere un nivel de humedad del 50 % de manera constante en el suelo para favorecer su óptimo desarrollo. Un exceso de humedad en el suelo reduce la cantidad de aire disponible, lo que afecta negativamente la producción. Por el contrario, cuando el banano enfrenta condiciones de estrés hídrico, los rendimientos del cultivo disminuyen significativamente. En este sentido, mantener una humedad estable es crucial, ya que tanto un exceso como una deficiencia de agua pueden perjudicar la productividad del banano (Anchundia Veliz, 2020).

1.2.5 Lignina

La lignina es un heteropolímero el cual se encuentra en la pared celular de todas las plantas brindando la rigidez de su estructura, forma parte de la biomasa la cual puede ser utilizadas para la obtención de productos renovables en la que previamente se debe realizar tratamientos para que esta rigidez se desdoble y facilite el proceso (Maceda, Soto Hernández, Peña Valdivia, Trejo, & Terrazas, 2022).

1.3 Sacarificación enzimática

El proceso de sacarificación enzimática se refiere a la transformación de los polisacáridos complejos (celulosa y hemicelulosa) en azúcares simples, como la glucosa y la xilosa, que son fermentables por microorganismos. *Trichoderma spp.*, una variedad de hongos famosa por su habilidad para generar potentes enzimas lignocelulolíticas, ha probado ser un agente eficaz en este procedimiento. Específicamente, las variedades de *Trichoderma*, como *T. reesei* y *T. viride*, se distinguen por su capacidad para generar celulasas, hemicelulasas y otras enzimas hidrolíticas que promueven la degradación de las estructuras de celulosa y hemicelulosa presentes en los productos vegetales (Toapanta Gaona & Narváez Pachar, 2024).

El raquis de banana (*Musa spp.*) es un residuo agrícola muy común, que usualmente se desecha después de la recolección del fruto. No obstante, por su elevada presencia de celulosa y hemicelulosa, representa una posible fuente de azúcares fermentables, que pueden emplearse en la elaboración de bioetanol, ácidos orgánicos y otros compuestos de valor añadido. El procedimiento de transformar la celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables implica una serie de fases bioquímicas complejas, donde la sacarificación enzimática juega un rol esencial (Perez Niebla & Sanchez Chunga, 2020).

1.3.1 Fosfato de amonio monobásico

El fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), también conocido como fosfato de amonio monobásico, forman un importante grupo de fertilizantes esenciales concentrados en las que se puede obtener sales (Wm H & R, 1929).

En el proceso de sacarificación enzimática, donde los polímeros de celulosa y hemicelulosa se descomponen en azúcares simples, el fosfato monoamónico desempeña un papel clave como nutriente esencial en el medio de cultivo utilizado para producir enzimas. Este compuesto aporta fósforo y nitrógeno necesarios para el metabolismo microbiano, favoreciendo el crecimiento celular y la producción de enzimas celulolíticas, como celulasas y hemicelulasas, fundamentales para este proceso (Dey, Singh, Scaria, & Anand, 2018).

1.3.2 *Trichoderma spp*

Los hongos del género *Trichoderma spp.* se destacan como una de las especies más investigadas en la producción de celulasas, enzimas esenciales para el procesamiento y aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, siendo este un hongo filamentoso saprófito que habita diversos sustratos, desempeñando un papel clave en los ecosistemas al descomponer materia orgánica y contribuir al ciclo de nutrientes en el suelo (Pineda Insuasti, Benavides Sotelo, & Trujillo, 2017).

Entre las especies más relevantes del género *Trichoderma* se destacan *T. harzianum*, *T. viride*, *T. reesei* y *T. asperellum*, cada una con propiedades específicas que las hacen valiosas para distintas aplicaciones en biotecnología y agricultura. En el ámbito de los azúcares fermentables, *Trichoderma spp.* juega un rol esencial en la conversión de biomasa lignocelulósica. Las enzimas que producen estas especies descomponen la celulosa y hemicelulosa, generando azúcares simples como glucosa y xilosa, fundamentales para procesos fermentativos en la elaboración de biocombustibles y otros productos industriales de alto valor (Hernández Melchor, Ferrera Cerrato, & Alarcón, 2019).

1.3.2.1 Enzimas producidas por *Trichoderma reesei*

La enzima de sacarificación a través de *Trichoderma spp.* se fundamenta en la generación de una mezcla de enzimas que comprenden celulasa, xilanasa, β -glucosidasa, entre otras.

Estas enzimas funcionan de forma sinérgica para desintegrar eficazmente las estructuras de celulosa y hemicelulosa: Celulasa: Transforma las cadenas celulósicas en unidades de glucosa. Xilanasas: Tiene un impacto en los enlaces β -1,4-glicosídicos de la hemicelulosa, liberando xilosa y otros azúcares y β -glucosidasas: La celobiosa transforma los oligómeros de glucosa en glucosa libre, favoreciendo así su fermentación (Valdés, Garita, Esquivel, & Villegas, 2020).

Según (Soto Fernández, 2021), el microorganismo *Trichoderma reesei* es muy empleado en la biotecnología por su habilidad para generar varias enzimas lignocelulolíticas, fundamentales para la descomposición de biomasa vegetal, tales como la celulosa y hemicelulosa, en azúcares que pueden fermentarse. Dentro de las enzimas más relevantes generadas por *T. reesei* se incluyen: Celulasas: Las endo- β -1,4-glucanasas, exo- β -1,4-glucanasas y β -glucosidasas degradan la celulosa a través de un proceso sinérgico para desintegrar las cadenas de celulosa. Las hemicelulasas: Comprenden xilanasas, arabinofuranosidasas, mannanasas y glucuronidasas, las cuales descomponen los polisacáridos de la hemicelulosa y liberan azúcares tales como xilosa, arabinosa y manosa. Ligninasas: A pesar de su menor volumen, *T. reesei* genera ligninasas, peroxidasas y lacasas que contribuyen a la descomposición de la lignina, una molécula que recalca en las paredes celulares de las plantas. Proteasas: Promueven la degradación de proteínas complejas, incrementando la digestibilidad de los materiales lignocelulóticos. Pectinasas: En las plantas, descomponen la pectina, lo que favorece la fermentación de desechos vegetales ricos en pectina. Lacasas: Enzima oxidativa que influye en sustancias fenólicas, simplificando la manipulación de materiales lignocelulóticos (Soto Fernández, 2021).

1.4 Azúcares fermentables

Los azúcares fermentables son carbohidratos de estructura sencilla o de cadenas cortas que pueden ser utilizados por levaduras y otros microorganismos a través de procesos de fermentación. Durante dicho proceso, estos azúcares se transforman en etanol, dióxido de carbono y diversos compuestos metabólicos. Su presencia es fundamental en la industria alimentaria, particularmente en la elaboración de bebidas alcohólicas, productos de panadería y una variedad de alimentos fermentados (Guaraca Vallejo, 2023).

La enzimática sacarificación de la celulosa y hemicelulosa del raquis de plátano, a través del uso de *Trichoderma spp.*, puede ofrecer una fuente eficaz de azúcares fermentables

como la glucosa, xilosa y arabinosa. Estos azúcares resultan fundamentales para la elaboración de bioetanol, un combustible renovable, o de otros valiosos compuestos químicos como ácidos orgánicos (ácido acético, ácido láctico), que se utilizan en la industria de alimentos, farmacéutica y de bioplásticos (García & Peralta, 2022).

Las variedades de *Trichoderma* generan un grupo de enzimas sumamente eficaces en la degradación de la celulosa y hemicelulosa, lo que optimiza la producción de azúcares que pueden ser fermentados. El uso de *Trichoderma spp.* En vez de otros métodos de sacarificación más costosos (como la aplicación de ácidos o altas temperaturas), puede disminuir considerablemente los gastos de procesamiento (Fiallos Cárdenas & Cumbicus Bravo, 2023).

1.4.1 Espectrometría UV visible

La espectrometría UV-Visible se fundamenta en la captación por moléculas de una muestra de la radiación electromagnética. Cuando una sustancia absorbe luz en el espectro ultravioleta o visible, los electrones de esta se excitan a un estado de energía superior, lo que facilita la identificación y cuantificación de los compuestos que se encuentran presentes. La radiación dentro del espectro UV-Visible se extiende entre 200 nm y 800 nm UV: Entre 200 y 400 nm - Visible: Entre 400 y 800 nm (Márquez, Cuji, Flores, & Méndez, 2021).

El espectrofotómetro UV-Visible es el aparato empleado para determinar la absorbancia o transmitancia de un material muestreado. La espectrometría UV-Visible es un método esencial para la detección, cuantificación y análisis de varias sustancias, particularmente en los campos de la química, bioquímica y farmacología (Trujillo Castillo, 2022).

1.5 Tratamientos

La estructura lignocelulósica, por su naturaleza compleja, dificulta la degradación o hidrólisis de los carbohidratos, impidiendo la obtención de azúcares fermentables. Por ello, es indispensable realizar un pretratamiento que descomponga esta estructura, aumentando la accesibilidad de la celulosa a las enzimas celulasas y facilitando así el proceso de sacarificación de la biomasa (Huang, y otros, 2021).

En términos generales, para incrementar el valor económico de los residuos agrícolas, es fundamental diseñar métodos alternativos de hidrólisis y desarrollar técnicas que minimicen la formación de reacciones secundarias no deseadas y la generación de

subproductos indeseables como el tratamiento de electrofluido, explosión de vapor térmico, tratamiento ultrasónico o tratamiento asistido por microondas (Wu, y otros, 2017).

1.5.1 Tratamiento de Electrólisis

Aplicación de una corriente eléctrica en la que se aplica un voltio a un fluido con el fin de facilitar la hidrólisis de componentes específicos de la lignocelulosa, transformándolos en azúcares (Wu, y otros, 2017).

1.5.2 Tratamiento térmico

En el proceso térmico, el agua no solo funciona como disolvente, sino también como reactivo o catalizador. A altas temperaturas, los enlaces glicosídicos presentes en los carbohidratos pueden romperse gracias a la acción catalítica del ion hidronio (H_3O^+), generado por la auto ionización de las moléculas de agua. Este mecanismo permite separar la hemicelulosa de la matriz de biomasa, transformándola en oligosacáridos y monosacáridos (Zhu, Tang, Ma, & He, 2023).

1.5.3 Tratamiento Alcalino

Es el tratamiento en la que se utiliza bases o sustancias alcalinas, el cual se lo emplea como una estrategia efectiva para diversas materias primas de biomasa, ya que permite superar su recalcitrancia al hidrolizar la hemicelulosa.; este proceso no solo mejora la eficiencia de la hidrólisis enzimática de la celulosa, sino que también posibilita una recuperación efectiva de la hemicelulosa (Huang, y otros, 2021).

METODOLOGIA

2.1 Lugar de la investigación

La investigación experimental y el análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de bioconversión de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH); esta se encuentra en la ciudad de Machala, Ecuador, que tiene una altitud media de 6 metros sobre el nivel del mar.

2.2 Acondicionamiento de la muestra.

Se utilizaron raquis de banano fresco, los cuales fueron recolectados de la finca bananera de la Universidad Técnica de Machala ubicada en la vía Panamericana Km 5 ½ vía Pasaje. La muestra después de elegirla a través de la inspección visual se trituró a 1730 rpm por 3 min para luego llevarla a un proceso de secado a 60 ° C por 96 h para obtener un diámetro de 250 µm.

2.3 Reactivos

- Ácido Sulfúrico (H₂SO₄).
- Ácido Clorhídrico (HCL).
- Hidróxido de Sodio (OH).
- DNS o ácido 3,5-dinitrosalicílico.
- Etanol (C₂H₆O).

2.4 Diseño de experimento

Con el objetivo de aumentar la producción de azúcares fermentables a partir de la sacarificación enzimática del raquis de banano se aplicará tres pretratamientos diferentes (alcalino, electrolisis e hidrotérmico). Se implementó un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) de un solo factor, con tres niveles correspondientes a diferentes condiciones aplicadas.

Tabla 3. Diseño experimental

Muestra	Pretratamiento		
Raquis (250µm)	T1	T2	T3
	Alcalino (NaOH)	Electrolisis	Hidrotérmico
Condiciones	0.75%	60 V por 1 h.	121 °C por 15min

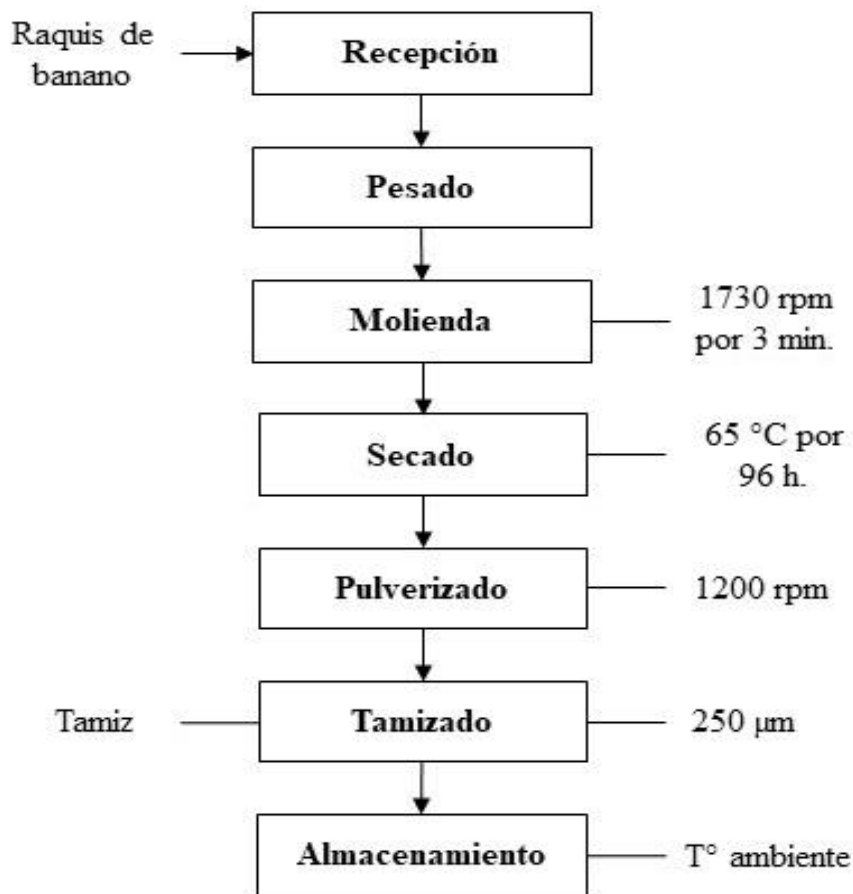
2.4.1 Definición de variables

El diseño experimental cuenta con variables independientes (tiempo y condiciones), variables dependientes (pH, azúcares reductores y celulosa), y variable de respuesta (azúcares fermentables).

2.4.2 Obtención de la muestra

2.4.2.1 Diagrama de flujo

Figura 5. Diagrama de flujo para la obtención de raquis de banano en polvo.



2.4.2.2 Descripción del proceso

Recepción: La materia prima, raquis de banano, fue recolectada en la finca bananera de manera visual, se seleccionó los pinzotes que se encontraban en buen estado es decir que no estén putrefactos.

Pesado: La materia prima fue dividida en cantidades específicas y pesada utilizando balanzas industriales MEASURE TEK Bench Scale, garantizando precisión en el proceso.

Molienda: El raquis de banano fue sometido a un proceso de reducción de tamaño en un molino industrial (Indução-Gaiola Zhejiang, China), operando a 1730 rpm durante un tiempo de 3 min.

Secado: El material triturado fue secado en una estufa VN6400 (Mettler, Schwaben, Alemania), bajo condiciones controladas de temperatura de 65 °C durante un período de 96 h, asegurando la eliminación eficiente de humedad residual.

Pulverización: El material seco fue pulverizado en un molino de alta velocidad Biobase, modelo HSD-400A, HSD-400A (Biobase, Shandong, China) operando a 1200 rpm durante 3 min, obteniéndose un polvo con partículas de tamaño promedio de 250 µm.

Tamizado: El producto pulverizado fue sometido a un proceso de tamizado en un RX-29 (RC-TAP, Puebla, Mexico), con mallas ajustadas a 250 µm, para separar partículas de mayor tamaño y asegurar la uniformidad del material.

Almacenamiento: Finalmente, la muestra tamizada, con un tamaño de partícula de 250 µm, fue almacenada en frascos color ámbar y conservada a temperatura ambiente para preservar sus propiedades.

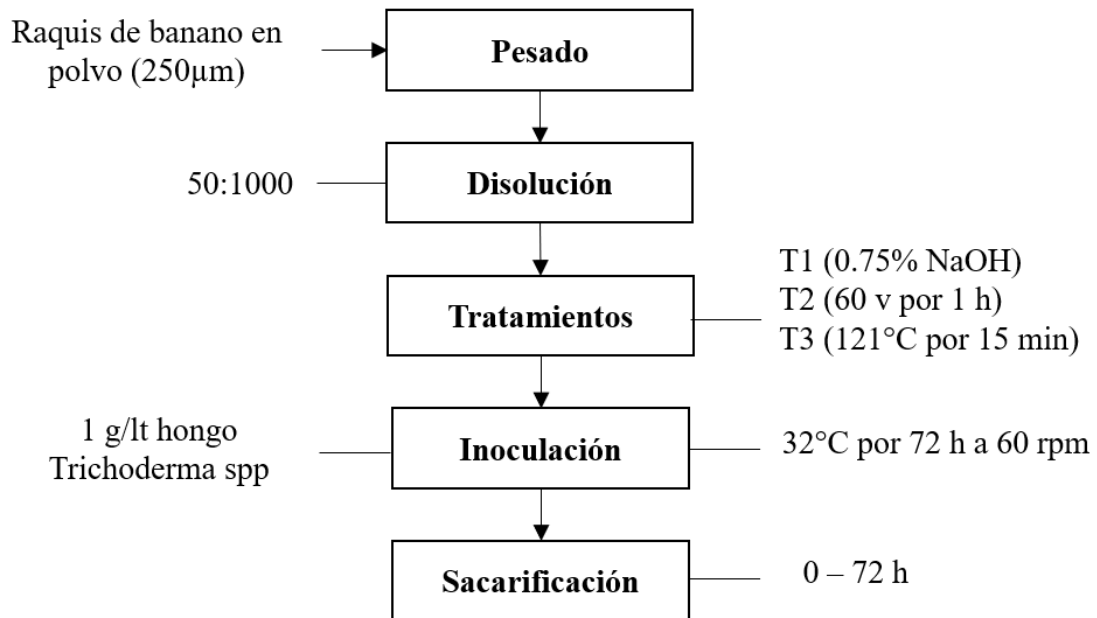
2.4.3 Tratamientos

Para los pretratamientos del raquis, se prepararon 50 g de material tamizado a 250 µm y se diluyeron en 1000 mL de agua en frascos de reacción. En el pretratamiento alcalino, se añadieron 7.5 g de hidróxido de sodio (NaOH) y se ajustó el pH a 4.8 con una solución al 20 % de ácido clorhídrico (HCl), dado que estas condiciones eran óptimas para el crecimiento de *Trichoderma reesei*. En el tratamiento por electrólisis, se aplicaron electrodos a 60 V durante 1 h y, tras enfriar la muestra, se adicionó el hongo *Trichoderma reesei*. Por último, en el pretratamiento hidrotérmico, los frascos se sometieron a un proceso en autoclave a 121 °C durante 15 min y, luego de enfriar la muestra, se le adicionó el hongo.

2.4.4 Hidrolisis enzimática

2.4.4.1 Diagrama de flujo

Figura 6. Diagrama de flujo para la hidrólisis enzimática.



2.4.4.2 Descripción del proceso

Pesado: Se pesaron 50 g de raquis en polvo con un tamaño de partícula de 250 μm , utilizando una balanza analítica de alta precisión.

Disolución: La muestra pesada de raquis en polvo fue disuelta en 1000 ml de agua destilada, asegurando una mezcla homogénea para los siguientes procesos.

Tratamiento: Se llevaron a cabo tres tipos de pretratamientos: Alcalino: Se utilizó una solución al 0.75 % de NaOH en un biorreactor TECNA (Biobase, Shandong, China), electrólisis: se aplicó una corriente alterna de 60 V durante 1 h, empleando una fuente de poder regulable e hidrotérmico: las muestras fueron sometidas a una temperatura de 121 °C durante 15 min en un autoclave marca ALL América, modelo 25X-120.

Inoculación: Se pesó 1 gramo del hongo *Trichoderma spp* y se adicionó a cada muestra pretratada. Estas se mantuvieron bajo condiciones controladas de 32 °C durante 72 h, a una agitación constante de 60 rpm, utilizando un biorreactor biorreactor TECNA (Biobase, Shandong, China).

Sacarificación: El proceso de sacarificación se evaluó mediante el análisis de azúcares fermentables, realizado a intervalos de 24 horas durante 3 días, para determinar la eficiencia del tratamiento.

2.5 Caracterización del raquis de banano

2.5.1 Determinación de pH

Se diluyo 10 g de raquis en polvo ($\leq 250 \mu\text{m}$) en 100 mL de agua destilada. El pH se midió introduciendo de forma directa el pH-metro 21700; (OAKTON, Madrid, España) previamente calibrado en el vaso de precipitación con la solución (1:10), una vez que se estabilice se anota el valor de la lectura y se obtiene datos por triplicado (Caicedo, y otros, 2020).

2.5.2 Humedad

El contenido de humedad del raquis en polvo fue gracias a una estufa VN6400 (Mettler, Schwaben, Alemania) bajo condiciones controladas de temperatura de 65 °C durante un período de 96 h, asegurando la eliminación eficiente de humedad residual.

Para el análisis, se tomó una muestra de 0,5 g de raquis en polvo, ajustando la temperatura a 105 °C hasta alcanzar un peso constante, el análisis se realizó por triplicado.

2.5.3 Determinación de cenizas

El porcentaje de cenizas se determina mediante la relación entre el peso del residuo obtenido (cenizas) y el peso inicial de la muestra, siguiendo el método AOAC 942.05. Para ello, se selecciona una cantidad específica de la muestra previamente secada, asegurándose de eliminar toda la humedad. Posteriormente, la muestra se coloca en un crisol resistente a altas temperaturas y se incinera en un horno mufla a temperaturas entre 500 °C y 600 °C, hasta eliminar completamente el material orgánico y obtener un residuo mineral estable. Una vez finalizada la incineración, el crisol con las cenizas se enfría en un desecador para evitar la absorción de humedad ambiental y se realiza su pesaje. Con estos datos, se calcula el contenido total de cenizas como proporción del peso inicial de la muestra, obteniendo así una medida precisa del contenido de ceniza presente según la ecuación (1), el análisis se realizó por triplicado.

$$\text{Porcentaje de cenizas (\%)} = \left(\frac{\text{Peso del residuo (cenizas)}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Peso del residuo (cenizas): Es el peso final del crisol con las cenizas menos el peso del crisol vacío (g) y

peso inicial de la muestra: Es el peso de la muestra seca antes de la incineración (g).

2.5.4 Lignina

El contenido de lignina se determinó mediante una versión modificada del método de lignina Klason. Se pesó 1 g de raquis de banana ($\leq 250 \mu\text{m}$) y previamente seca, el cual se trató con 15 mL de H_2SO_4 al 72 % a temperatura ambiente, bajo agitación constante a 120 rpm durante 2 horas. Posteriormente, la solución ácida se diluyó con agua desionizada hasta alcanzar una concentración del 3 % y se sometió a calentamiento en autoclave a 121 °C y 2 atm durante 1 h. Tras enfriar, la solución fue filtrada, y la lignina insoluble en ácido se cuantificó gravimétricamente. La lignina soluble se aisló mediante precipitación por acidificación. El filtrado combinado se acidificó añadiendo H_2SO_4 5 N gota a gota hasta alcanzar un pH de 2-3. El precipitado resultante se centrifugó, lavó hasta pH neutro y secó a 100 °C hasta obtener un peso constante, el análisis se realizó por triplicado.

2.5.5 Celulosa

Se disuelven 2,5 g de raquis de banano seco ($\leq 250 \mu\text{m}$) en 50 mL de agua destilada. De la solución resultante, se toma una alícuota de 2 mL que se mezcla con 1 mL de solución acuosa de fenol al 5 % en un tubo de ensayo. A esta mezcla, se le añaden rápidamente 5 mL de ácido sulfúrico concentrado. Los tubos de ensayo se dejan reposar durante 10 minutos, se agitan durante 30 s y posteriormente se colocan en un baño de agua a temperatura ambiente durante 20 s para permitir el desarrollo del color. El blanco y la solución estándar se preparan siguiendo el mismo procedimiento, empleando el carbohidrato de interés. Finalmente, la muestra se transfiere a una celda y se mide su absorbancia en un espectrofotómetro, programando la longitud de onda a 490 nm, el análisis se realizó por triplicado (Monroy Soler, 2014)

2.5.5 Extraíbles

La eliminación de compuestos extraíbles se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM D 1109-84. Para ello, se agregaron 100 mL de NaOH al 1 % p/v a 7 g de la muestra en un vaso de precipitación de 250 mL. La solución se agitó y se tapó para luego someterla a un baño maría a 100 °C durante una hora. Durante este proceso, se realizaron tres agitaciones en intervalos de 10, 15 y 25 min. Transcurrido este tiempo, el contenido del vaso se filtró con una bomba de vacío y papel filtro previamente pesado. Posteriormente, se efectuaron lavados con 100 mL de agua caliente y 50 mL de CH₃COOH al 10% v/v, filtrando a fondo con agua caliente. El papel filtro con la muestra se secó a temperatura ambiente durante 24 horas y luego se colocó en una estufa a 105 ± 5 °C por 4 horas. Después, se enfrió en un desecador por 20 min y se pesó hasta obtener un peso constante (Guerrero Villa & Amaya Pinos, 2021).

El contenido de extraíbles se calculó por triplicado mediante la siguiente ecuación (2):

$$\% \text{ Extraíbles en NaOH al 1\%} = \left(\frac{P_i}{P_i - P_f} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

P_i: Peso inicial de la muestra (g) y

P_f: Peso final de la muestra (g)

2.5.6 Holocelulosa

La determinación se realizó siguiendo el método ASTM D-1104. Para ello, se utilizaron 2 g de muestra libre de extractivos, colocados en un matraz de 250 mL de cuello no esmerilado. La muestra se sometió a un baño maría a una temperatura entre 75 y 85 °C y se trató con 150 mL de agua destilada, 0.2 mL de ácido acético glacial y 1 g de hipoclorito de sodio. Posteriormente, el matraz fue tapado y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 1 h. Transcurrido este tiempo, se añadió nuevamente 0.2 mL de ácido acético glacial y 1 gramo de hipoclorito de sodio, repitiendo este procedimiento cada h durante 5 h o hasta que la muestra adquiriera una coloración blanca. Una vez alcanzado este color, el matraz se colocó en un baño de hielo hasta que la muestra alcanzó una temperatura de 10 °C. Luego, el contenido fue filtrado y lavado con agua destilada fría, observando que el residuo amarillo se tornara completamente blanco. Se preparó un crisol etiquetado, el cual se secó previamente y en donde se ubicó la muestra para su secado en una estufa a 105 °C. Una vez seco, el crisol se trasladó a un desecador y se pesó en una balanza analítica hasta alcanzar un peso constante. Finalmente, la muestra obtenida fue almacenada para su posterior análisis de contenido de celulosa.

Para los cálculos, se empleó la siguiente ecuación (3), basada en el residuo seco obtenido después del tratamiento con ácido acético e hipoclorito de sodio y el secado en estufa, los datos obtenidos fueron por triplicado (Paladines Condoy & Tinoco Loayza, 2019).

$$\% \text{ Holocelulos} = \left(\frac{\text{PMf}}{\text{PMo}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

PMo: Peso de la muestra antes del tratamiento y secado (g) y

PMf: Peso de la muestra después del tratamiento y secado (g).

Determinación de glucosa

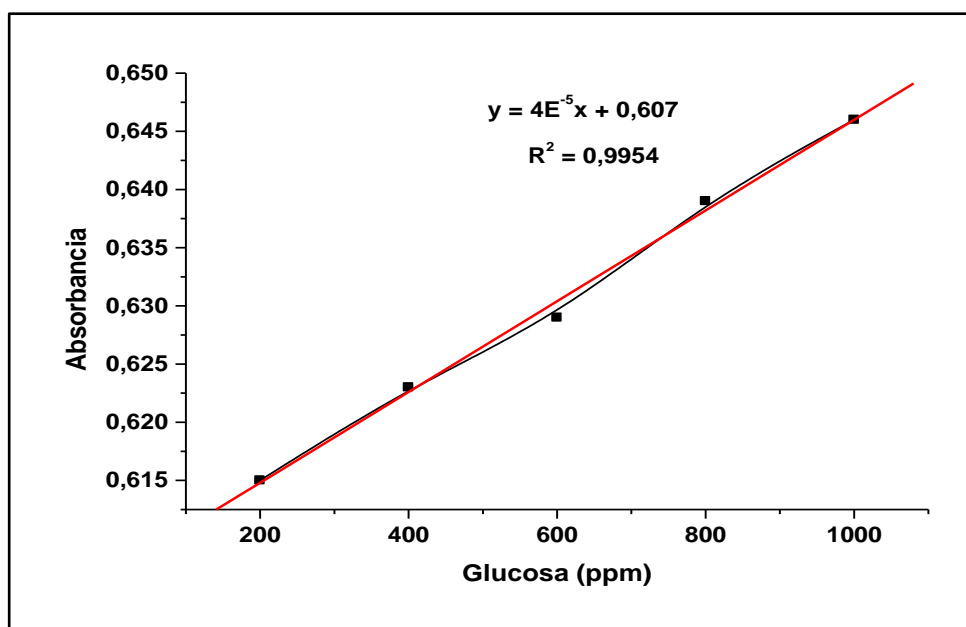
Para determinar las cantidades de celobiosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) generada en el proceso parcial de hidrólisis enzimática de la celulosa presente en el raquis de banano ($\leq 250 \mu\text{m}$), se tomó un 1,5 mL de muestra en un tubo eppendorf y se centrifugaron a 10 000 rpm por 5 min y se pasaron a través de un filtro jeringa de 0,22 μm , previo análisis en un equipo

de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), modelo Agilent Technologies 1100, equipado con un detector de índice de refracción (G-1362A XR RI). Se empleó una columna SUPERCOGEL C-610H (A, Sluiter.; B, Hames.; R, Ruiz.; C, Scarlata.; J, Sluiter.; D, 2008) . La temperatura de la columna se fijó a 50°C. Se utilizó H₂SO₄ 5 mM como la fase móvil a un caudal de 0,6 mL / min.

La cuantificación de celobiosa se realizó mediante curvas de calibración construida en el rango de 0, 100, 200, 400, 600, 800 y 1000 mg * L⁻¹ de concentración de estándares preparados manualmente, donde el equipo provee automáticamente la concentración de celobiosa en mg * L⁻¹.

La curva de calibración se obtuvo de la relación directa entre el área del pico de celobiosa y las relaciones de las respectivas concentraciones figura 7 (Sluiter, Hames, Ruiz, Scarlata, & Sluiter, 2008).

Figura 7. Curva de calibración con solución patrón para las muestras de raquis.

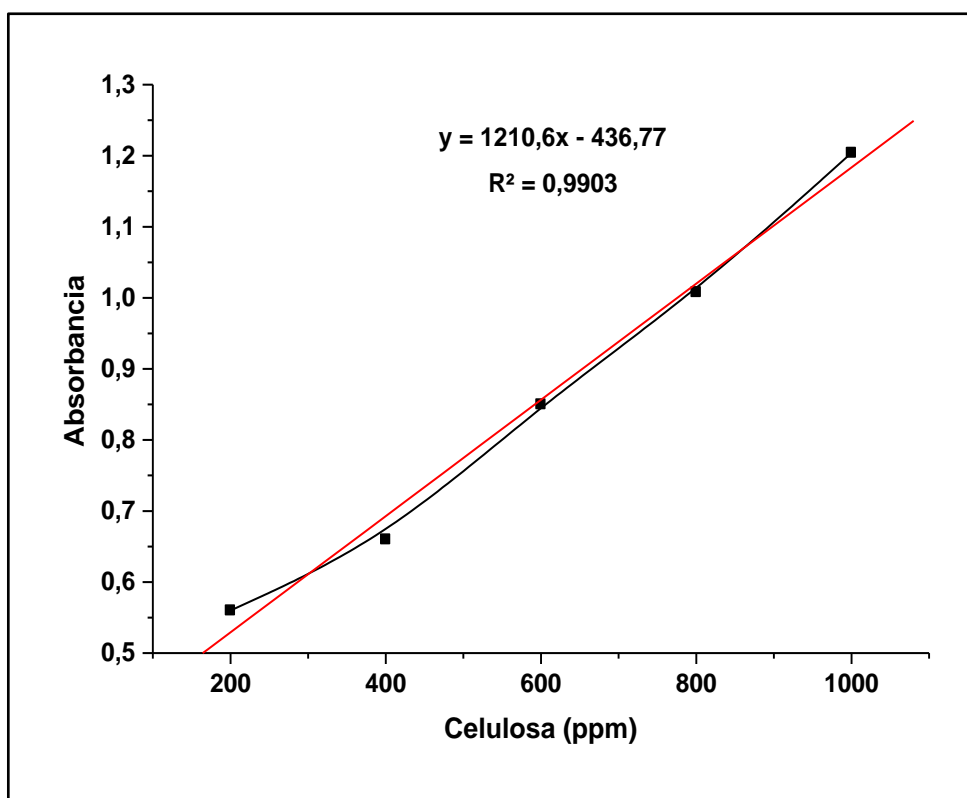


Se obtuvo la ecuación de la recta $y = 0,00004x + 0,607$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9954$, donde “y” representa la absorbancia (nm) de la glucosa; 0,00004 es la pendiente de la recta (m), “x” es la concentración de glucosa (mg/L) y +0,607 el intercepto (b) en el eje de las Y. Esta ecuación se utilizará para determinar las concentraciones de azúcares fermentables obtenidas durante la hidrólisis enzimática para cada tratamiento.

Curva de calibración de celulosa

Para la calibración de azúcares fermentables, se empleó el método FENOL-SULFURICO para medir la concentración de celulosa en cada disolución. Las lecturas se realizaron utilizando un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 490 nm, como se muestra en la Figura 6. (Sluiter, Hames, Ruiz, Scarlata, & Sluiter, 2008)

Figura 8. Curva de calibración con solución patrón para las muestras de raquis.



2.6 Caracterización de los tratamientos (alcalino, electrólisis y térmico)

2.6.1 Evaluación de pH en la producción de azúcares fermentables.

El pH se midió introduciendo de forma directa el electrodo del pH-metro 21700; (OAKTON, Madrid, España) previamente calibrado en el orificio del biorreactor; una vez que se estabilice se anota el valor de la lectura. Esta evaluación se dará durante el tiempo de 0, 24, 48 y 72 h.

2.6.2 Evaluación de la celulosa en la producción de azúcares fermentables.

Se siguió la metodología descrita en el inciso 2.5.4. pero en este caso se evaluó el contenido de celulosa por cada tratamiento durante el tiempo de 0, 24, 48 y 72 h.

2.6.3 Azúcares reductores

2.6.3.1 Preparación del reactivo DNS o ácido 3,5-dinitrosalicílico

Se pesa 1,6 g de NaOH, 43,8 g de tartrato de Na-K y 1 g de ácido 3,5-dinitrosalicílico. Se agrega el NaOH a un vaso de precipitado con 50 mL de agua destilada hasta disolver completamente, luego se agrega el tartrato de Na-K lentamente hasta disolver por completo la solución mediante agitación magnética, y se agrega el ácido 3,5-dinitrosalicílico, protegiendo el reactivo de la luz con papel aluminio. En seguida, se afora la solución hasta 100 mL con agua destilada en un balón aforado de 100 mL y se deja en agitación toda la noche en un frasco ámbar (Montañez Burgos, 2020)

2.6.3.2 Determinación de la concentración de azúcares reductores

Se centrifugaron las muestras de caldo hidrolizado por ocho minutos a 4000 revoluciones por minuto en la centrifuga EBA 270 (Mettich, Tuttlingen, Alemania). Se añadieron 0,25 mL de muestra y 0,25 mL del reactivo DNS en tubos tapa rosca cubiertos con papel aluminio para proteger la reacción de la luz. Los tubos se colocan en un baño termostático a 92 °C por cinco minutos. Se detiene la reacción con enfriamiento en hielo por otros cinco minutos y se agregan 2,5 mL de agua destilada a cada tubo, se agita y se realiza la lectura de la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro. Se realizó una regresión lineal a la curva de calibración, se despejó la variable concentración en función de la absorbancia medida, y se reemplazaron los datos obtenidos (Montañez Burgos, 2020)

2.7 Análisis Estadísticos

Se aplicará un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95 %, con el objetivo de determinar el tratamiento que alcanza la mayor media en la producción de azúcares fermentables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización fisicoquímica del raquis de banano

En la Tabla 8, se muestran las propiedades fisicoquímicas del raquis de banano en polvo ($\leq 250 \mu\text{m}$), el cual presenta un color marrón claro a oscuro, un olor ligero con notas herbales y un sabor neutro o ligeramente terroso y su textura es granulada.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del raquis de banano.

Propiedades fisicoquímicas	Valor
pH	10,26 ± 0,01
Humedad (%)	3,67 ± 0,12
Cenizas (%)	27,67 ± 0,67
Lignina (%)	9,10 ± 0,10
Celulosa (g/l)	0,0009 ± 0,0001
Holocelulosa (%)	66,90 ± 0,50
Extraíbles (%)	45,44 ± 0,51

Los resultados fueron expresados como el promedio ± la desviación estándar de la muestra.

Los resultados que se obtuvieron para la caracterización fisicoquímica del raquis de banano en polvo obtenido por medio de un proceso de secado a 65 °C fueron los siguiente; pH de 10,26; Humedad de 3,67 %; Cenizas de 27,67 %; Lignina de 9,10 %; Celulosa de 0,0009 g/L; holocelulosa de 66,90 % y de extraíbles del 45,44 %.

Los datos de humedad obtenidos en esta investigación muestran una tendencia similar a los reportados por (Mendoza Guzman & Torres Jungal, 2021), quienes registraron valores entre 3,5 % y 4 % tras un secado a 70°C de raquis de banano. En cuanto a la caracterización química de la biomasa de la planta de banano, (Palacios, 2016) reportó valores de lignina y holocelulosa en el raquis de 10,38 % y 75,23 %, respectivamente, los cuales son comparables con los obtenidos en este estudio.

Por otro lado (Paladines Condoy & Tinoco Loayza, 2019) , reportaron un contenido de holocelulosa del 53 % en el raquis de banano, valor inferior al registrado en nuestra investigación, esto se debe a presencia de impurezas y compuestos extractivos en la muestra puede interferir en la cuantificación precisa de la holocelulosa, debido a que; estos componentes pueden reaccionar con los reactivos utilizados en el análisis o alterar la composición final del material estudiado. Según (Mora Fernández, 2016), si el tratamiento no elimina completamente sustancias como grasas, ceras, polifenoles y otros compuestos solubles, estos pueden influir en el cálculo del contenido de celulosa y hemicelulosa, generando una sobreestimación o subestimación de la holocelulosa.

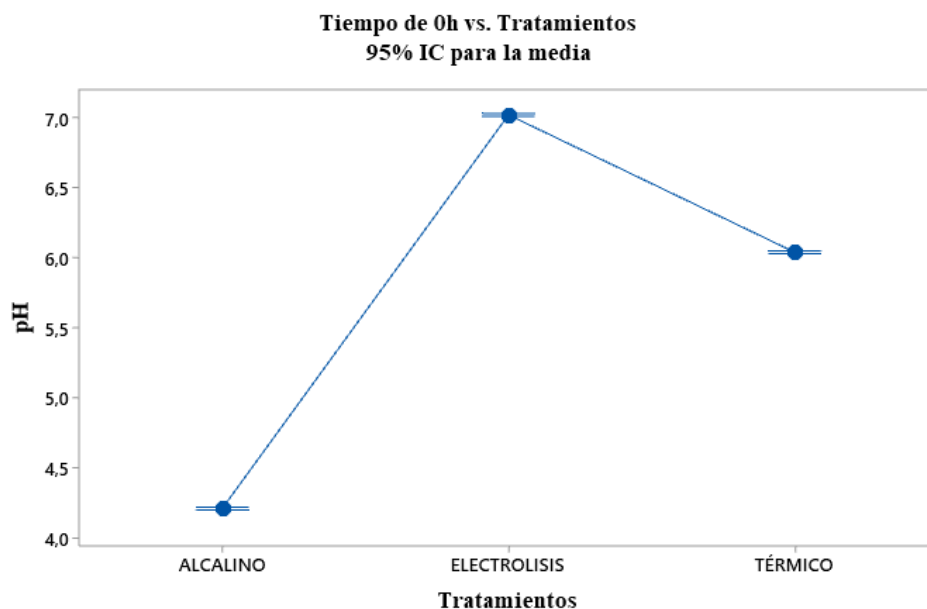
(Guerrero Villa & Amaya Pinos, 2021), en su estudio sobre la extracción de celulosa a partir de residuos de pasto, determinó que este es un material lignocelulósico, compuesto

por celulosa, hemicelulosa y lignina en proporciones variables, al igual que el raquis de banano. En su investigación, obtuvo valores de extraíbles en NaOH al 1 % superiores al 40 %, resultados que coinciden con los obtenidos en este estudio.

3.2 Evaluación del pH en la producción de azúcares fermentables

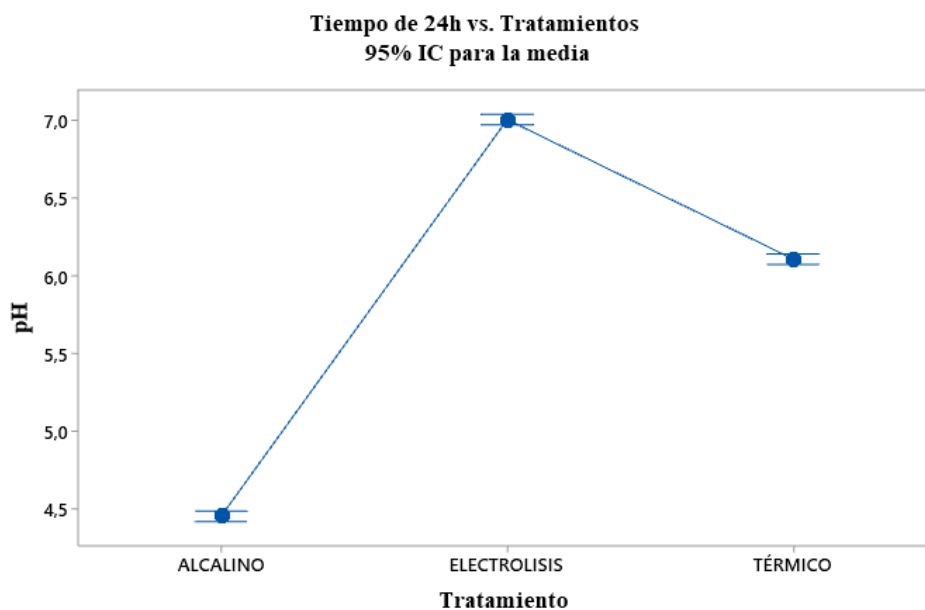
Se llevó a cabo un análisis de varianza ANOVA de un solo factor para determinar diferencias significativas entre los tratamientos: alcalino, electrólisis, térmico.

Grafica 1. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

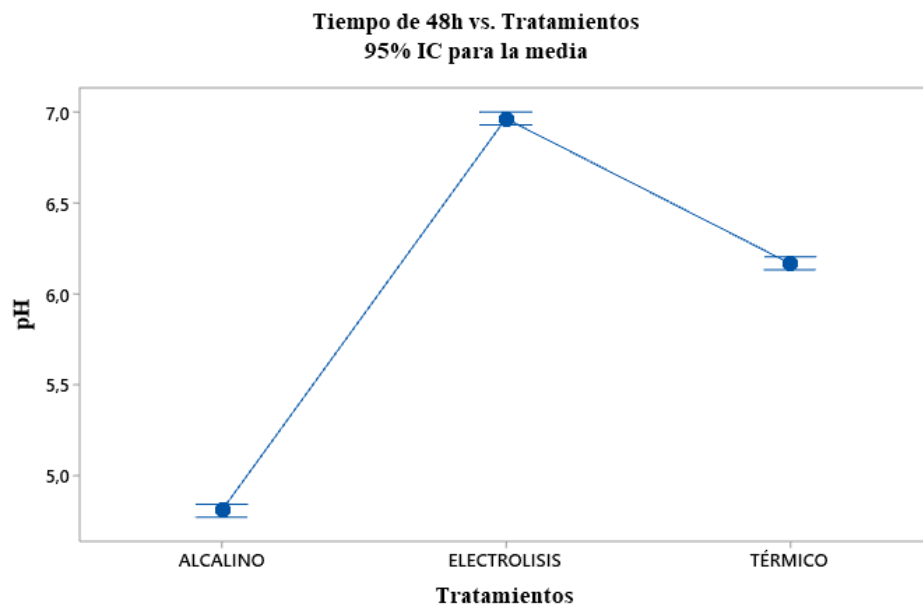
Grafica 2. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada tratamiento.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

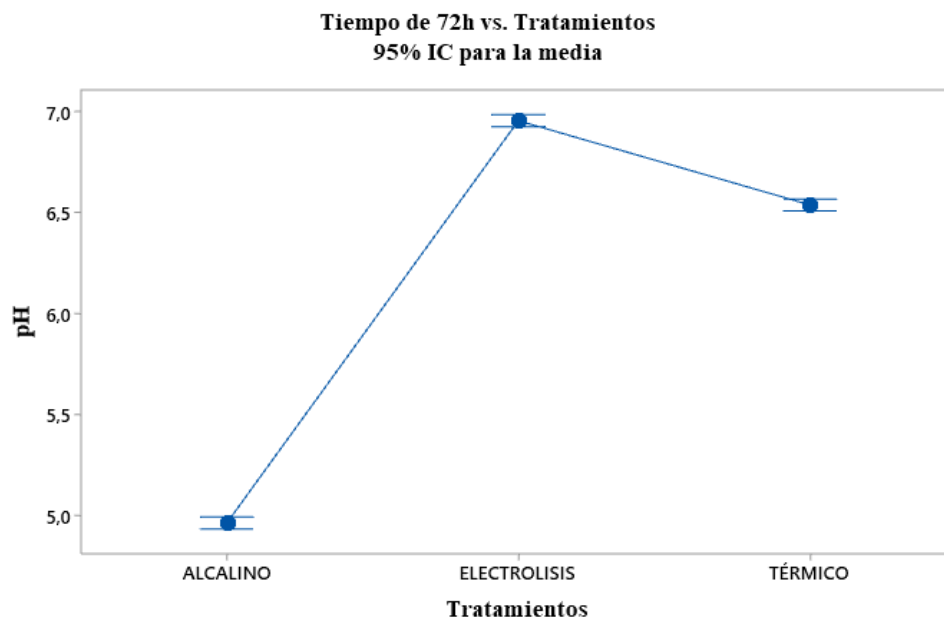
En la Gráfica 1 se observa cómo los diferentes tratamientos generan condiciones específicas de pH al inicio del proceso y tras 24 h de hidrólisis enzimática. Inicialmente, el tratamiento alcalino presenta el pH más bajo (4,3-4,5), indicando un entorno ácido que podría inhibir ciertas enzimas hidrolíticas pero favorecer la acción de otras como algunas proteasas ácidas (Paez, 2003). La electrólisis, en cambio, eleva el pH a valores cercanos a la neutralidad (7,0), lo que sugiere una alteración química del sustrato debido a la generación de especies reactivas o redistribución de cargas moleculares. Por su parte, el tratamiento térmico genera un pH intermedio (5,5-6,0), posiblemente por la liberación de compuestos tamponantes o desnaturalización de proteínas que modifican el equilibrio ácido-base. En la Gráfica 2, a las 24 h, el tratamiento alcalino mantiene un pH constante, indicando baja producción de subproductos o actividad enzimática limitada en este entorno ácido. En la electrólisis, el pH sigue estable en torno a 7,0, reflejando una hidrólisis eficiente sin acumulación de ácidos o bases que alteren el sistema. Según (Lupano, 2013), en el tratamiento térmico, el pH disminuye ligeramente, probablemente debido a la liberación de compuestos ácidos derivados de la degradación de lípidos o péptidos. En conclusión, estos resultados sugieren que la electrólisis ofrece las condiciones más favorables y estables para una hidrólisis enzimática eficiente, mientras que los otros tratamientos generan condiciones afectando el rendimiento del proceso.

Grafica 3. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Grafica 4. Comportamiento del pH mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Luego de 48 h (Grafica 3) y 72 horas (Grafica 4) de hidrólisis enzimática, se observan variaciones significativas en el pH dependiendo del tratamiento aplicado: alcalino, electrólisis y térmico. En el tratamiento alcalino, el pH muestra un ligero aumento (5,0) a las 48 horas. Por otro lado, el tratamiento por electrólisis mantiene el pH cerca de la neutralidad (7,0) durante todo el proceso, con una ligera tendencia a disminuir después de las 48 horas, lo que sugiere una hidrólisis sostenida y equilibrada sin cambios drásticos en la acidez, posicionándose como el método que ofrece el mayor control químico. En contraste, el tratamiento térmico estabiliza el pH en valores cercanos a 5,5 lo que indica una acumulación progresiva de productos ácidos. En conclusión, estos resultados destacan que la electrólisis proporciona las condiciones más favorables y estables para la hidrólisis enzimática, mientras que los tratamientos alcalino y térmico generan ambientes menos óptimos debido a la persistencia de la acidez o la tendencia a la acidificación.

Tabla 5. Comportamiento del pH en la producción de azúcares fermentables en cada tratamiento durante 72 horas para cada tratamiento con inóculo de *Trichoderma spp.*

TRATAMIENTO	pH			
	0 h	24 h	48 h	72 h
T. Electrólisis	7,02 ± 0,01 a	7,00 ± 0,01 a	6,96 ± 0,01 a	6,95 ± 0,03 a
T. Térmico	6,04 ± 0,01 b	6,11 ± 0,01 b	6,17 ± 0,02 b	6,54 ± 0,02 b
T. Alcalino	4,21 ± 0,01 c	4,45 ± 0,04 c	4,81 ± 0,04 c	4,96 ± 0,02 c

Los resultados fueron expresados como el promedio ± la desviación estándar de la muestra.

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados del análisis estadístico indicaron que los valores de pH presentan diferencias significativas entre tratamientos en cada uno de los tiempos evaluados (0, 24, 48 y 72 h).

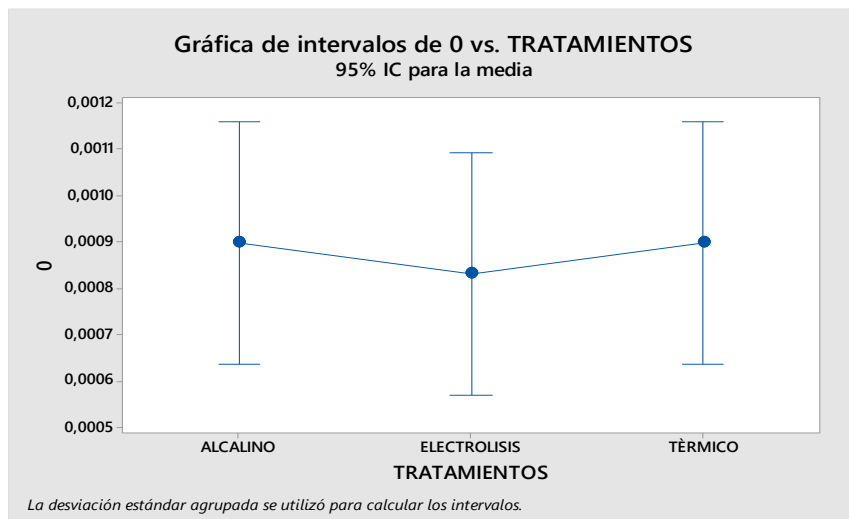
En el T. Electrólisis a medida que aumenta el tiempo disminuye el pH, teniendo un valor de 6,95 a las 72 h. De la misma manera, el T. Alcalino a medida que incrementa el tiempo disminuye significativamente el pH, pero en este caso resulta tener valores más bajo debido a la presencia (HCL al 20 %) en el pretratamiento, concluyendo a las 72 h con un

valor de pH de 4,96. Mientras que, el T. térmico a medida que aumenta el tiempo los valores de pH aumentan, presentando un valor de 6,54 al transcurrir 72 h.

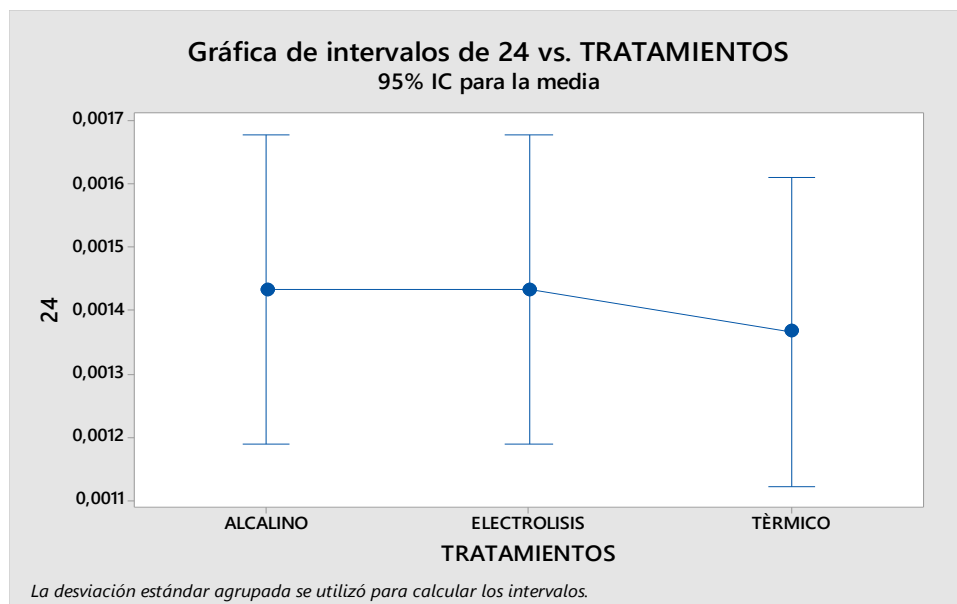
3.3. Comportamiento de la celulosa en la producción de azúcares fermentables.

El análisis de varianza ANOVA de un solo factor permite determinar diferencias significativas entre los tratamientos: alcalino, electrólisis, térmico.

Grafica 5. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento.

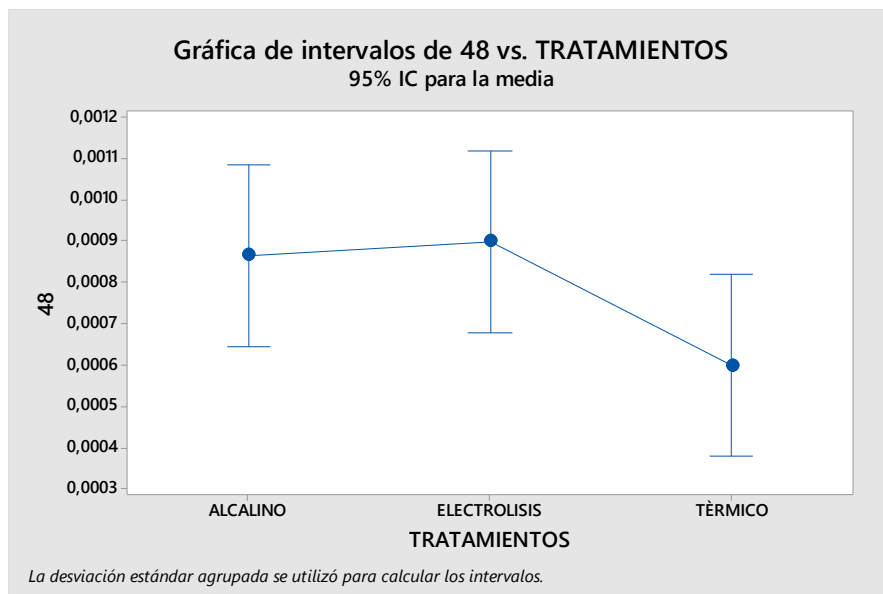


Grafica 6. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada tratamiento.

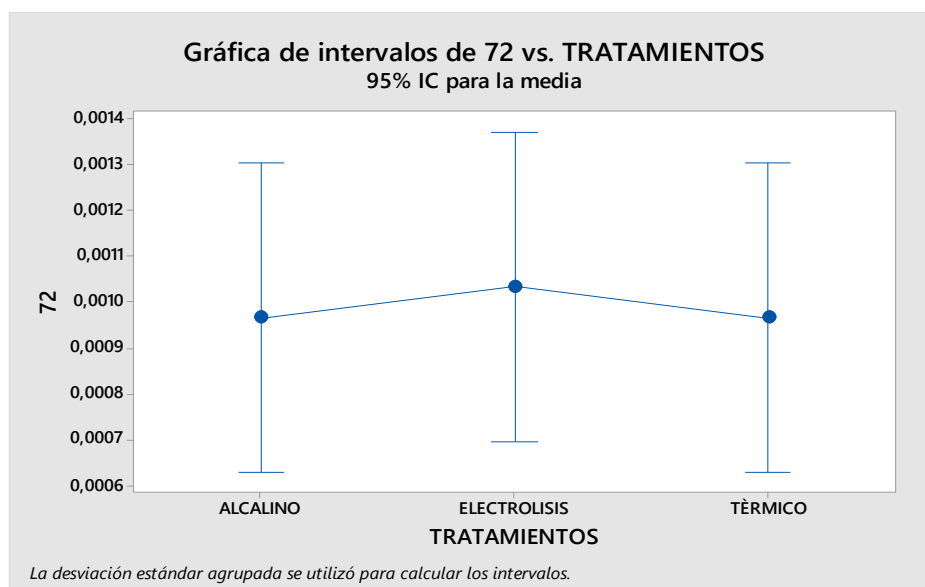


El primer valor de la celulosa al tiempo 0 no varía significativamente en los tres tratamientos: alcalino, electrólisis, térmico; debido al inicio de la acción enzimática, conforme se incrementa el tiempo a las 24 horas los valores no presentan diferencias significativamente en ambos tratamientos debido a las condiciones utilizadas. Según (Da Silva, y otros, 2024), afirma que se debe usar un tratamiento combinado de (T.térmico 121 °C, 120 min y T.alcalino NaOH al 2 %) acompañado de hidrólisis enzimática con el uso de un biorreactor a (200 rpm, 50 °C, durante 48 h) para obtener una mejor producción de azúcares fermentables.

Grafica 7. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento.



Grafica 8. Comportamiento de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento.



A las 48 h en los tres tratamientos hubo una disminución en los valores de la concentración de la celulosa, debido a las condiciones utilizadas para la producción enzimática en el biorreactor las cuales fueron 32° C a 60 rpm y para que exista el mismo mecanismo las condiciones recomendables deben ser a 28° C, 150 rpm por una semana (Cabrera, 2023). Según lo reportado por (Paksung, Pfersich, Arauzo, Dennis, & Kruse, 2020) afirma que en el tratamiento térmico el agua se calienta de una forma fácil en la autoclave permitiendo ingresar a las estructuras internas de la biomasa celulósica haciendo que los valores a las 48 h presente un bajo valor significativo disminuyendo la presencia del sustrato para las enzimas celulíticas.

Tabla 6. Celulosa de raquis de banano y comportamiento mediante hidrólisis enzimática a través del tiempo (0, 24, 48 y 72 horas) para cada tratamiento con inóculo de *Trichoderma spp.*

TIEMPO	TRATAMIENTO	CELULOSA (g/l)		
0 h	T. Electrólisis	0,0008	±	0,0002 a
	T. Térmico	0,0009	±	0,0002 a
	T. Alcalino	0,0009	±	0,0002 a
24 h	T. Electrólisis	0,0014	±	0,0002 a
	T. Térmico	0,0014	±	0,0002 a
	T. Alcalino	0,0014	±	0,0001 a
48 h	T. Electrólisis	0,0009	±	0,0002 a
	T. Térmico	0,0006	±	0,0002 a
	T. Alcalino	0,0009	±	0,0001 a
72 h	T. Electrólisis	0,001	±	0,0002 a
	T. Térmico	0,001	±	0,0004 a
	T. Alcalino	0,001	±	0,0001 a

Los resultados fueron expresados como el promedio \pm la desviación estándar de la muestra.

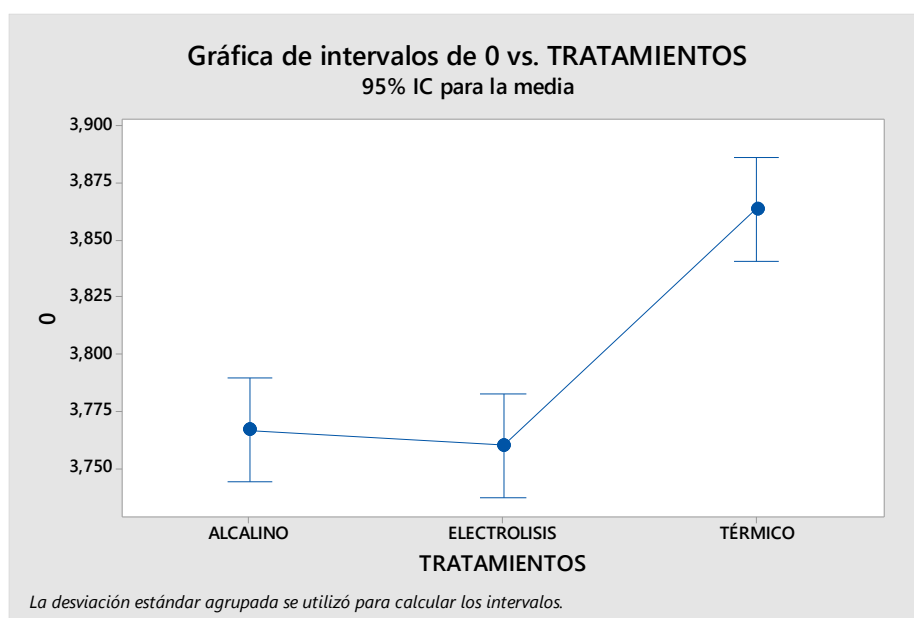
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En la tabla 6, se establecieron los valores obtenidos durante (0, 24, 48 y 72 h de estudios), las cuales mostraron los resultados del análisis estadístico indicaron que los valores de la celulosa no presentaron diferencias significativas entre tratamientos en cada uno de los tiempos evaluados (0, 24, 48 y 72 h) debido a la temperatura utilizada la cual no fue la adecuado para el proceso de la hidrolisis de la celulosa esta presento una menor liberación de azúcares. En investigaciones realizadas (Texco López, Cervantes, & Cadena, 2019) afirma que la temperatura de proceso ideal para los tratamientos es de 175^a y 185° por 5 min.

3.4. Producción de azúcares fermentables en raquis de banano

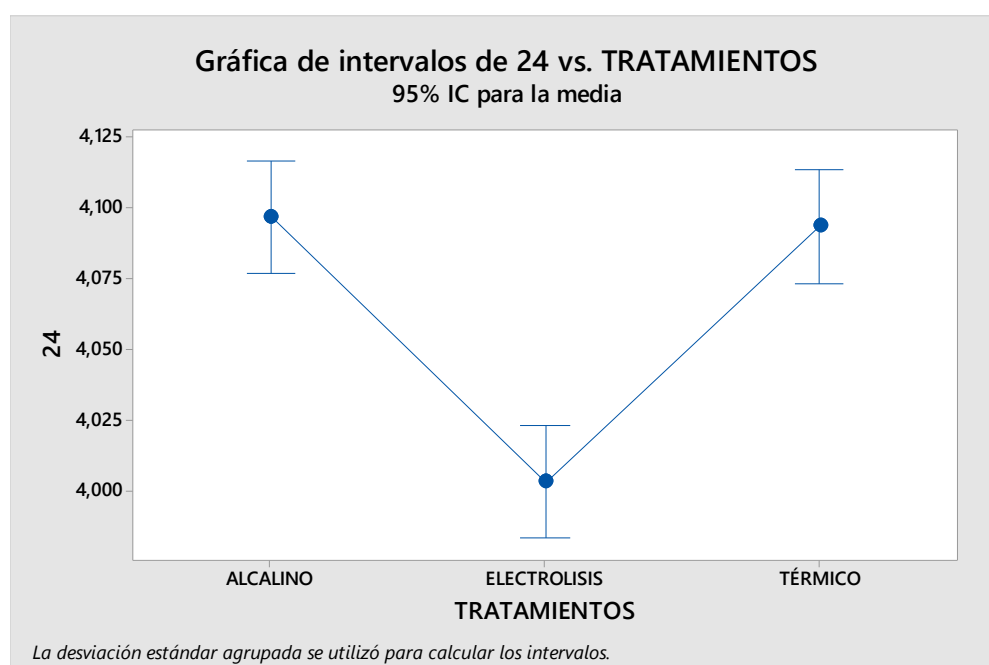
Para determinar diferencias significativas se realizó un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) entre los tratamientos :alcalino, electrólisis, térmico.

Grafica 9. Comportamiento de azúcares fermentables de raquis de banano mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (0h) para cada tratamiento



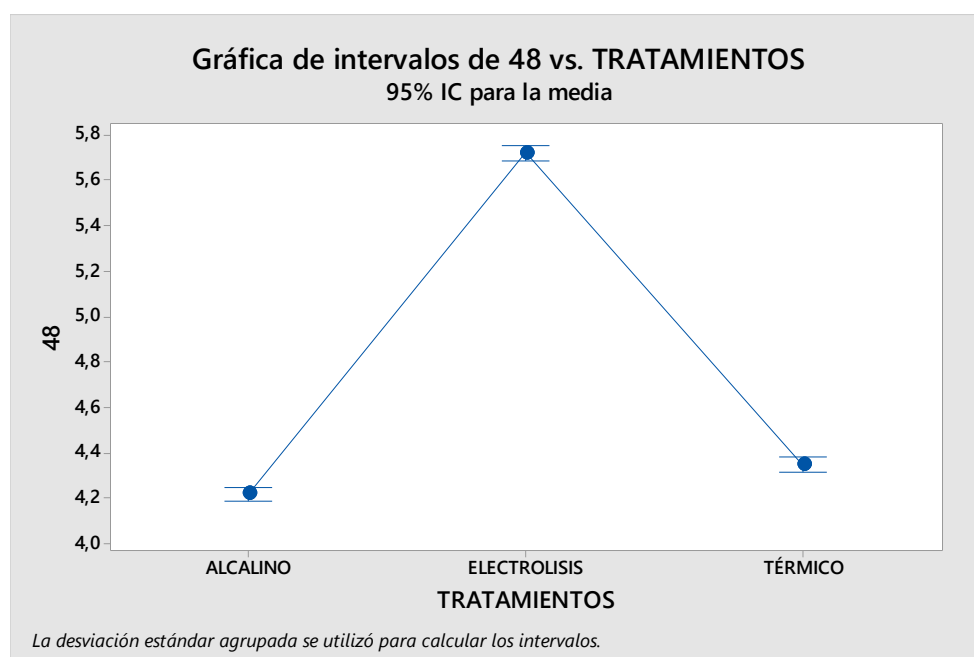
En la grafica 9, el tratamiento alcalino y electrolisis del día 0 reflejan presentaron valores semejantes, a diferencia del tratamiento térmico en el que hubo un incremento notable en la media; esto se atribuye al uso del DNS. En estudios realizados (Cuaspué Cáliz, 2017) afirma que el reactivo antes mencionado permite un comportamiento diferencial debido a la capacidad de oxidar los azúcares reductores.

Grafica 10. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (24h) para cada pretratamiento.

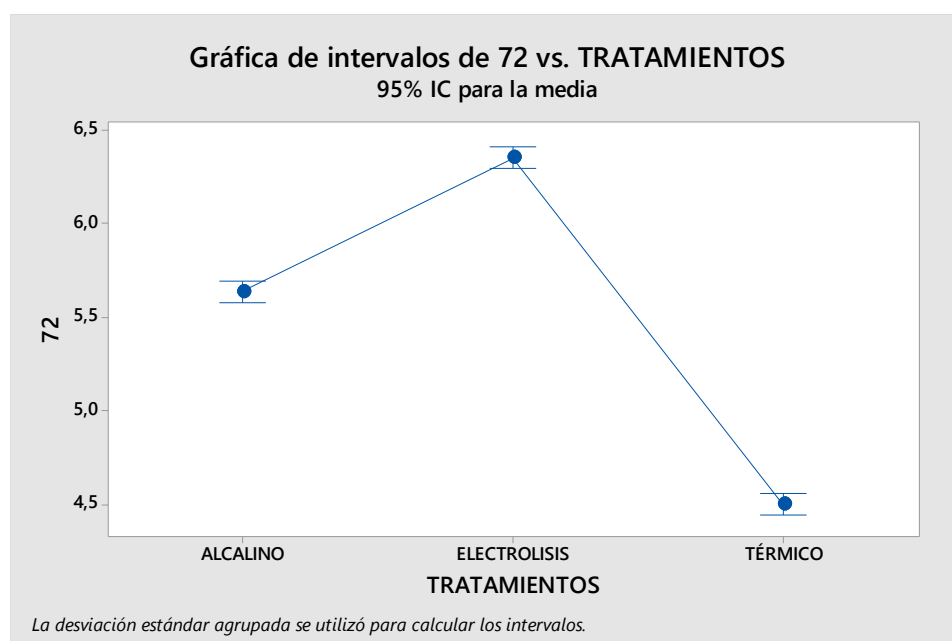


En la gráfica 10, se puede observar que a las 24 h entre el tratamiento alcalino y térmico no tienen diferencia significativa debido a la temperatura y presión usada en el proceso (Carranza Saavedra, Alvarado Núñez, Méndez Reyes, Valenzuela Real, & Solanilla Duque, 2015), Afirma que el raquis se ve afectado por la presión generando el desdoble de polímeros que conlleva a mayor cantidad de azúcares monoméricos. En el tratamiento de la electrólisis tiene un valor significativamente menor en relación al tratamiento alcalino y térmico.

Grafica 11. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (48h) para cada tratamiento.



Grafica 12. Comportamiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática a través del tiempo (72h) para cada tratamiento.



En la figura 11 y 12, se logró obtener la mayor producción de azúcares fermentables durante las 72 h en el tratamiento de la electrolisis (Cabrera Cortés, 2023) afirma en investigaciones que al aplicar corriente eléctrica a un fluido da paso a un rompimiento de células vegetales facilitando la separación de compuestos lignocelulósicos. En el tratamiento alcalino aumenta significativamente se le atribuye por las concentraciones de los reactivos y las condiciones utilizados en el proceso, según (López Miranda, Soto Cruz, Rutiaga Quiñonez, & Medrano Roldán, 2009) afirma que este tratamiento el (NaOH) descompone los enlaces lignina- carbohidrato facilitando la sacarificación enzimática.

Tabla 7. Azúcares fermentables de raquis de banano y comportamiento mediante hidrólisis enzimática a través del tiempo (0, 24, 48 y 72 horas) para cada tratamiento con inóculo de *Trichoderma spp.*

TRATAMIENTO	Azúcares fermentables (g/l)			
	0 h	24 h	48 h	72 h
T. Electrólisis	3,76 ± 0,01 b	4,00 ± 0,02 b	5,72 ± 0,02 a	6,35 ± 0,05 a
T. Térmico	3,86 ± 0,02 a	4,09 ± 0,01 a	4,35 ± 0,02 b	4,50 ± 0,03 c
T. Alcalino	3,77 ± 0,02 b	4,10 ± 0,01 a	4,22 ± 0,03 c	5,64 ± 0,04 b

Los resultados fueron expresados como el promedio ± la desviación estándar de la muestra.

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados obtenidos presentaron diferencias significativas entre las h (0,24,48,72).
de cada tratamiento.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización del raquis de banano (Tamaño de partícula de 250u), se reportaron de la siguiente manera; lignina 9.10 %, pH de 10,26; Humedad 3,67 %; Cenizas 27,67 %; Celulosa 0,0009 g/L, mismos que tienen un grado de similitud en comparación a la bibliografía de la investigación, a diferencia de la holocelulosa 66,90 %, valor inferior según otros autores.

El tratamiento electrólisis a un parámetro de comparación de 72 horas, reflejo un valor de 6.35g/L, considerándolo el más idóneo para la producción de azúcares fermentables debido al rompimiento de la biomasa lignocelulósica, descomponiendo la pared lignocelulósica con el objetivo de obtener una cadena de carbohidratos más simples.

La metodología empleada (FENOL-SULFURICO) nos permite evaluar el comportamiento de celulosa durante los tiempos de tratamientos, identificando valores de pH, concentración de azúcares fermentables y reductores, obteniendo datos importantes para la comparación estadística en base a un análisis de varianza ANOVA de un solo factor con la finalidad de determinar diferencias significativas entre los tratamientos.

A través de la metodología Espectrofotometría UV-Visible con una longitud de onda de 490 nm y utilizando una celda de cuarzo, se pudo identificar de manera cuantitativa los azúcares fermentables producidos en la hidrólisis enzimática de los tratamientos (alcalino, electrólisis, térmico) durante las 72 h de estudio.

Los hallazgos de este estudio resaltan el uso potencial del raquis de banano como una fuente viable de biomasa debido al contenido lignocelulósico para la obtención de productos de valor agregado, ayudando a disminuir los desechos a través de la contribución a la economía circular con una alternativa viable, sostenible y promoviendo el avance de tecnologías más ecológicas en el sector alimentario.

RECOMENDACIONES

La concentración de reactivos en la investigación es de crucial importancia, tal es el caso del Hipoclorito de Sodio (NaClO) que debe ser usado en una concentración altas con el objetivo de garantizar los resultados esperados en cuanto al contenido de celulosa.

Uno de los controles importantes en la investigación es la estabilidad del hongo *Trichoderma spp*, el cual cumple la función de sintetizar celulosas a un pH de 4,8 por tal virtud se recomienda que la concentración de Ácido Clorhídrico (HCl) debe ser idónea (baja) para poder garantizar la estabilidad el hongo y poder sintetizar la celulosa en la muestra.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Espinoza, Y. M., & Marin Cuenca, K. C. (2023). *Espumas de carbón oxidadas con TEMPO a partir del raquis de banano para la recuperación de Itrio en soluciones acuosas*. Obtenido de Repositorio Digital de la UTMACH: https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/22335/1/Trabajo_Titulacion_2037.pdf
- Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez López, E., & Grande Tovar, C. D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: a contribution to a circular economy. *Molecules*, 26(17), 5282. doi: 10.3390/molecules26175282
- Anchundia Veliz, A. A. (2020). *APROVECHAMIENTO DE RAQUIS DE BANANO MEDIANTE BIOESTABILIZACIÓN DE TRICHODERMA HARZIANUM PARA REDUCIR CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR FERTILIZANTES QUÍMICOS SINTÉTICOS*. Obtenido de Trabajo de Titulación, Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias Carrera de Ingeniería Ambiental, Guayaquil.: https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ANCHUNDIA%20VELIZ%20ARIANA%20ASTRID.%201_compressed.pdf
- Cabrera Cortés, L. A. (05 de Enero de 2023). *Evaluación de extractos de enzimas lignocelulolíticas del hongo Trichoderma harzianum en la generación de azúcares fermentables a partir de vaina de frijol*. Obtenido de Repositorio Institucional: <https://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/4717/Trabajo%20de%20graduacio%cc%81n%20Luigi%20Cabrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera, C. (05 de Enero de 2023). *Evaluación de extractos de enzimas lignocelulolíticas del hongo*. Obtenido de Repositorio Institucional: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4717?show=full>
- Caicedo, W., Viáfara, D., Pérez, M., Alves Ferreira, F. N., Rubio, G., Yanza, R., . . . Ferreira, W. M. (2020). Características químicas del ensilado de raquis de plátano (*Musa paradisiaca*) y banano orito (*Musa acuminata* AA) tratado con suero de leche y urea. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(4). doi:<http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v31i4.19035>.
- Cajo Guerrero, S. I., & Vásquez Ramos, D. (2017). *Obtención de azúcares fermentables por hidrólisis enzimática a partir de los residuos de mango (*Mangífera Indica* L.)*. Obtenido de Línea de Investigación Biotecnología, Pimentel – Perú: <https://hdl.handle.net/20.500.12802/4280>
- Calle Castro, S. N., & Tufiño Bejarano, D. B. (2024). *Comparación de la hidrólisis enzimática a partir de dos enzimas en la cáscara del cacao (*Theobroma cacao* L.) Para la obtención de azúcares reductores y su posible aplicación en procesos*

de fermentación. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27119>

- Cardoso Araújo, D. J., Machado, A. V., & Guerra Vilarinho, M. C. (2019). Availability and Suitability of Agroindustrial Residues as Feedstock for Cellulose-Based Materials: Brazil Case Study. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 2863-2878. doi:<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0291-0>
- Carranza Saavedra, D., Alvarado Núñez, J. A., Méndez Reyes, D. A., Valenzuela Real, C. P., & Solanilla Duque, J. F. (2015). Pretratamiento de residuos de plátano (*Musa paradisiaca* (L.) AAB). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 019-035.
- Carranza Saavedra, D., Alvarado Núñez, J. A., Méndez Reyes, D. A., Valenzuela Real, C. P., & Solanilla Duque, J. F. (2015). Pretratamiento de residuos de plátano (*Musa paradisiaca* (L.) AAB) y arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) para la obtención de azúcares fermentables. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 6(1), 019-035. doi:<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20153345362>
- Coelho Costa, A. P., Zuniga Linan, L., Mendonça Cidreira, A. C., Hatami, T., Cabral Júnior, A. A., Cutrim Gomes, R., & Cardoso Rocha, J. J. (2022). Oxidación con Persulfato de Amonio de la Biomasa Lignocelulósica y de la Biomasa del Açai para la Extracción de Nanocristales de Celulosa: Revisión. *Revista ION*, 35(1), 67–93. doi:<https://doi.org/10.18273/revion.v35n1-2022005>
- Cuaspud Cáliz, O. J. (2017). *Repositorio Unal*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62315/1053790403.2017.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Da Silva, M. F., Flaibam, B., De Mélo, A. H., Sampaio, U., P.S. Clerici, M. T., & Goldbeck, R. G. (2024). Optimization of enzymatic hydrolysis of cellulose extracted from bamboo culm for bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* modified via CRISPR/Cas9. *Food Research International*, 192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114768>
- Dey, P., Singh, J., Scaria, J., & Anand, A. P. (8 de Septiembre de 2018). Improved production of cellulase by *Trichoderma reesei* (MTCC 164) from coconut mesocarp-based lignocellulosic wastes under response surface-optimized condition. *Springer Nature*, 8(402). doi:10.1007/s13205-018-1421
- Espinach, F., Monzon, M., Paz, R., Ortega, R., Fullana, P., Bala, A., . . . Tarrés, Q. (2024). Composites made of a blend of plastics recovered from bottle caps reinforced with fibers from banana rachis waste. A Circular Economy Strategy in the Canary Islands. *Journal of Cleaner Production*, 483, 144244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144244>
- Fan, H., & Xia, L. (2015). Cellulase production by recombinant *Trichoderma reesei* and its application in enzymatic hydrolysis of agricultural residues. *Fuel*, 143, 211-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.056>

- Ferrer Gutiérrez, J., Marcheno Revilla, J., Blacio Toro, S., & Vera Infante, T. (2020). Localización y producción potencial de una planta de pirolisis para la valorización de residuos agrícolas. *Revista Científica Académica Multidisciplinaria*, 5(12). doi: <https://doi.org/10.23857/pc.v5i12.2046>
- Fiallos Cárdenas, M. A., & Cumbicus Bravo, A. L. (2023). *Evaluación Físicoquímica de Extractos de Hojas de MUSA SPP y su impacto en la obtención de Celulosa Bacterial*. Obtenido de Universidad Estatal de Milagro: <https://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/7018>
- Galán, V., Rangel, A., Lopez, J., Perez Hernandez, J. B., Sandoval, J., & Souza Rocha, H. (2018). Propagación del banano: técnicas tradicionales, nuevas tecnologías e innovaciones. *Revista Brasileira De Fruticultura*, 40(4), 1-21. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452018574>
- García Batista, R. M., Quevedo Guerrero, J. N., & Socorro Castro, A. R. (2020). Practices for the use of solid waste in banana plantations and results of its implementation. *Universidad y Sociedad*, 12(1), 280-291. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/343571595_Practices_for_the_use_of_solid_waste_in_banana_plantations_and_results_of_its_implementation
- García, E., & Peralta, D. (2022). Hidrólisis enzimática de bagazo de caña (*Saccharum sp* híbrido) para la producción de azúcares simples. *Científica Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(18), 119-131. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.6481849>
- Gonzales Calva, L. D., & Zuma Lalangui, J. D. (2021). *Valorización del raquis de banano mediante su codigestión anaerobia con residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergía*. Obtenido de UTMACH, Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Machala, Ecuador.: https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/17357/1/T-20406_GONZALES%20CALVA%20LUIS%20DAVID.pdf
- Guaraca Vallejo, N. A. (16 de Junio de 2023). *Extracción de azúcares fermentables a partir del nopal (opuntia ficus) de la estación experimental Tunshi-Riobamba mediante hidrólisis ácida como fuente de obtención de bioetanol*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21540>
- Guarnizo Franco, A., & Martínez Yepes, P. N. (31 de Diciembre de 2011). Estudio de la hidrólisis ácida del raquis de banano. *Revista De Investigaciones Universidad Del Quindío*, 22(1), 83-91. doi:<https://doi.org/10.33975/riuq.vol22n1.661>
- Guerrero Villa, Y. P., & Amaya Pinos, J. B. (2021). *Extracción de la celulosa a partir de los residuos de pasto común (Festuca arundinacea) para la elaboración de acetato de celulosa*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21590>
- Hernández Melchor, D. J., Ferrera Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). Trichoderma: IMPORTANCIA AGRÍCOLA, BIOTECNOLÓGICA, Y SISTEMAS DE FERMENTACIÓN PARA PRODUCIR BIOMASA Y ENZIMAS DE INTERÉS

- INDUSTRIAL. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(1), 98-112. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000205>
- Hoyle Vega, P. M., & Rodriguez Lopez, C. A. (2019). “Estabilización del suelo de la trocha carrozable con fibras de raquis de *Musa Paradisiaca* y cenizas de hojas *Eucaliptus* de los caseríos Canchas a Colcap, Jimbe, Santa, Áncash – 2019”. Obtenido de Repositorio Digital Institucional: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46335>
- Huang, Y., Chu, Q., Tong, W., Wu, S., Jin, Y., Hu, J., & Song, K. (2021). Carbocation scavenger assisted acid pretreatment followed by mild alkaline hydrogen peroxide (AHP) treatment for efficient production of fermentable sugars and lignin adsorbents from hardwood biomass. *Industrial Crops and Products*, 170, 113737. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113737>
- INEC. (2023). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*. . Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Boletin_tecnico_ESPAC_2023.pdf
- Khalaf Al-Saidi, S. M., Nasser Al-Kharousi, Z. S., Rahman, M. S., Sivakum, N., Rasul Suleria, H. A., Ashokkumar, M., . . . Al-Habsi, N. (16 de Marzo de 2024). hermal and structural characteristics of date-pits as digested by *Trichoderma reesei*. *10(6)*. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e28313
- Larenas, C. (2018). *Banana rachis as a potential source of second generation ethanol*. Obtenido de <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/118828>
- Leu Yuan, S., & Zhu, J. (1 de Noviembre de 2012). Substrate-Related Factors Affecting Enzymatic Saccharification of Lignocelluloses: Our Recent Understanding. *BioEnergy Research*, 6, 405-415. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/S12155-012-9276-1>
- Lima, P. C., Karimian, P., Johnston, E., & Hartley, C. J. (2024). The Use of *Trichoderma* spp. for the Bioconversion of Agro-Industrial Waste Biomass via Fermentation: A Review. *Fermentation*, 19(9), 442. doi:<https://doi.org/10.3390/fermentation10090442>
- Lizarraga Alvarez, E. L., Haro Dominguez, D. M., & Cordova Valles, L. E. (2020). Fermentación de residuos de café con *Aspergillus Niger* para la producción de celulasa. *Revista De Innovación y Transferencia Productiva*, 1(1), e005. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpegclefindmkaj/https://www.cedepas.org.pe/sites/default/files/fermentacion_de_residuos_de_cafe.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpegclefindmkaj/https://www.cedepas.org.pe/sites/default/files/fermentacion_de_residuos_de_cafe.pdf)
- López Miranda, J., Soto Cruz, N. O., Rutiaga Quiñonez, O. M., & Medrano Roldán, H. y. (2009). Revista Internacional de Contaminación. *OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN ENZIMÁTICA DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE PINO*, 95-102.

- Lupano, C. E. (28 de 10 de 2013). *Modificaciones de componentes de los alimentos: cambios químicos y bioquímicos por procesamiento y almacenamiento*. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/109796>
- Maceda, A., Soto Hernández, M., Peña Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2022). Lignin: composition, synthesis and evolution. *Scielo*, 1-16.
- Márquez, L., Cuji, P., Flores, D., & Méndez, C. (2021). La Validación del método de cuantificación de lignina en biomasa de pino. *Química Central*, 7(2). doi:<https://doi.org/10.29166/quimica.v7i2.3258>
- Mendoza Guzman, G. S., & Torres Jungal, C. L. (2021). *Cinética de hidrólisis enzimática del raquis de banano para la producción de azúcares fermentables*. Obtenido de UTMACH, Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Machala, Ecuador: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/16766>
- Monroy Soler, L. M. (2014). *academia edu*. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38932449/manualdemtodosgeneralesparadeterminaciondecarbohidratos-141106162652-conversion-gate02-libre.pdf?1443548282=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMANUAL_DE_METODOS_GENERAL_ES_PARA_DETERMI.pdf&Expir
- Montañez Burgos, J. L. (2020). CUANTIFICACIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES DEL SUSTRATO EN RESIDUOS DE PIÑA CON EL MÉTODO DEL ÁCIDO 3,5-DINITROSALICÍLICO. *Revista de Investigación*, 58-66.
- Mora Fernández, N. (2016). *Aprovechamiento energético de biomasa forestal. Separación de componentes*. Obtenido de Repositorio Institucional: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/3181>
- Moreira Morales, J. E., & Solorzano Vanegas, A. S. (6 de Mayo de 2020). OBTENCIÓN DE ETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DE BANANO. *Repositorio Digital de la UTMACH*, 9-48.
- Paez, L. A. (Septiembre de 2003). *bindani.iz*. Obtenido de DETERMINACIÓN DE LA ESPECIFICIDAD DE PROTEASAS: <https://bindani.izt.uam.mx/downloads/j098zb56b?locale=es>
- Palacios, G. M. (2016). *Caracterización química de la biomasa procedente de las hojas, pseudotallo, raquis y pseudopeciolo de la planta de banano y su relación con el poder calorífico*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26232>
- Paladines Condoy, D. F., & Tinoco Loayza, B. X. (2019). *Obtención de celulosa a partir de raquis de banano aplicado a la remoción de plomo y cadmio en solución acuosa*. Obtenido de UTMACH, Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Machala, Ecuador: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14097>
- Perez Niebla, A. T., & Sanchez Chunga, D. J. (2020). *Análisis de la obtención de fibras de celulosa a partir de raquis de banano mediante extracción tradicional y*

- extracción acelerada*. Obtenido de Facultad De ciencias Químicas Y De La Salud, Machala, Ecuador: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15661>
- Pineda Insuasti, J. A., Benavides Sotelo, E. N., & Trujillo, D. (2017). Producción de biopreparados de *Trichoderma* spp: una revisión. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Sistema de información Científica Redalyc*, 51(1), 47-52. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223153894008>
- Prado Cabrera, V. L., & Ferrer Gutierrez, J. P. (2020). *ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN DE UNA PLANTA PARA LA REVALORIZACIÓN POR PIRÓLISIS DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN PLANTACIONES DE BANANO*. Obtenido de Repositorio Digital de la UTMACH: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/16323>
- Romero Bonilla, H., Macías Balón, C., Palacios Moreno, A., & Redrovan Pesantez, F. (2019). Estudio cinético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales de la cáscara de banano maduro. *Industrial Data*, 22(1), 187-202. doi:<https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16534>
- Sartori, T., Tibolla, H., Prigol, E., Colla, L. M., Viera Costa, J. A., & Bertolin, T. E. (2015). Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Residues by Cellulases Obtained from Solid State Fermentation Using *Trichoderma viride*. *BioMed Research International*, 2015(1). doi:<https://doi.org/10.1155/2015/342716>
- Scribano, F. R., Fontana, M. L., Luaces, P., & Cáceres, S. (2018). Efecto del embolsado y deschire del cultivo de banano (*Musa acuminata* Colla) sobre las poblaciones de trips (Thysanoptera: Thripidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 77(3), 1-7. doi:<https://doi.org/10.25085/rsea.770302>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, C., Scarlata, C., & Sluiter, J. a. (January de 2008). *National Renewable Energy Laboratory*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42623.pdf>
- Soto Fernández, B. E. (2021). *Determinar la eficiencia de Beauveria bassiana en el control de Stenotarsonemus spinki Smiley y Trichoderma harzianum en el control de Gaeumannomyces graminis en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en el distrito de Alanje, provincia de Chiriquí Panamá*. Obtenido de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11575>
- Sun, S., & Cao, X. (2016). The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresource Technology*, 199, 49-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061>
- Texco López, A., Cervantes, J. Á., & Cadena, R. A. (01 de Junio de 2019). EFECTO DEL PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (ALTA PRESIÓN) E HIDROLISIS ENZIMÁTICA DE CLADODIOS DE *Opuntia ficus-indica* SOBRE LA LIBERACIÓN DE AZÚCARES Y SU USO POTENCIAL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 1039-1049. doi:<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.21>

- Toapanta Gaona, J. N., & Narváez Pachar, A. K. (2024). *Evaluación de diferentes métodos de extracción para la obtención de nanofibras de celulosas puras a partir del raquis de banano*. Obtenido de Repositorio Digital de la UTMACH : <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/23547>
- Trujillo Castillo, A. M. (4 de Mayo de 2022). *Espectrofotometría UV-Vis para estimar la degradación de la furazolidona y sus efectos tóxicos en un sitio industrial*. Obtenido de Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. : <https://ri.ujat.mx/bitstream/200.500.12107/4638/1/Alejandra%20Michelle%20Trujillo%20Castillo.pdf>
- Valdés, S., Garita, C., Esquivel, C., & Villegas, L. R. (2020). Aislamiento y purificación de la enzima lacasa: evaluación de su potencial biodegradador en residuos agrícolas. *BioTecnología*, 24(2). Obtenido de <https://smbb.mx/wp-content/uploads/2020/08/6-Valdes-et-al-2020.pdf>
- Vargas Corredor, Y. A., & Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias*, 14(1), 59-72. doi:<https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Vásquez Castillo, W., Racines, M., Moncayo, P., Viera, W., & Seraquive, M. (2019). Calidad del fruto y pérdidas poscosecha de banano orgánico *Musa acuminata* en el Ecuador. *Enfoque UTE*, 10(4). doi:<https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.545>
- Vásquez Orozco, R. (2017). El impacto del comercio del Banano en el desarrollo del Ecuador. *Revista afese*. Obtenido de <https://www.afese.com/img/revistas/revista53/comerbanano.pdf>
- Vera Rodríguez, J. H., Torres Sánchez, S. T., Macías Rojas, H. A., Galarza Cabrera, J. Á., Piña Reinoso, L. E., Morán Cabrera, W. N., . . . Cabrera Guaraca, Ó. M. (2021). Valoración nutricional de los residuos orgánicos de banano en el cantón La Troncal, Ecuador. 26(01), 78-86. doi:<https://doi.org/10.5377/ruc.v26i01.11882>
- Wm H, R., & R, M. a. (1929). Preparation Properties of Ammonum Phosphates. *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, 286-289.
- Wu, F., Jin, Y., Li, D., Zhou, Y., Guo, L., Zhang, M., . . . Yang, N. (2017). Electrofluid hydrolysis enhances the production of fermentable sugars from corncob via in/reverse-phase induced voltage. *Bioresource Technology*, 234, 158-166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.012>
- Zhiminaicela Cabrera, J. B., Quevedo Guerrero, J. N., & García Batista, R. M. (2020). LA PRODUCCIÓN DE BANANO EN LA PROVINCIAL DE EL ORO Y SU IMPACTO EN LA AGROBIODIVERSIDAD. *Revista Científica Multidisciplinaria de la Universidad Metropolitana de Ecuador*, 3(3), 189-195. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/7217/721778107024.pdf>
- Zhu, L., Tang, W., Ma, C., & He, Y.-C. (2023). Efficient co-production of reducing sugars and xylooligosaccharides via clean hydrothermal pretreatment of rape straw.

Bioresource Technology, 388, 129727.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129727>