

Evaluación de la producción de jarabe glucosa extraído de residuos de plátano
como alternativa edulcorante en el mercado nacional

Presenta

ADRIANA MARCELA VARGAS SANCHEZ

Trabajo final

DIRECTOR: Dr. C. Devis Suárez Rivero

CODIRECTORA: Ms. C. Olga Marín Mahecha

Fundación Universitaria Agraria de Colombia
(UNIAGRARIA)

Facultad de Ingeniería

Programas de Ingeniería de Alimentos e Ingeniería Agroindustrial

Bogotá D.C

2025

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	7
1. JUSTIFICACIÒN.....	9
2. PROBLEMÀTICA.....	11
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. Objetivo General.....	13
3.2. Objetivos Específicos.....	13
4. MARCO TEÓRICO.....	14
4.1. Biomasa lignocelulósica.....	14
4.2. Biomasa Natural.....	14
4.3. Biomasa de cultivos energéticos.....	15
4.4. Residuos de biomasa.....	15
4.5. El almidón.....	15
4.7. La amilopectina.....	17
4.8. Enzimas.....	18
4.9. α -amilasa.....	18
4.10. Jarabe de glucosa.....	19
4.11. La glucosa.....	19
4.12. Hidrolisis.....	20
4.13. Campos electromagnéticos.....	20
4.16. Fermentaci3n.....	22
4.16.1. Fermentaci3n anaerobia.....	22
4.16.2. <i>Thichoderma viride</i>	23
5. ANTECEDENTES.....	24
6. MARCO LEGAL.....	26
7. MATERIALES Y MÈTODOS.....	28

7.1.	Tipo de Investigación	28
7.2.	Ubicación en tiempo y espacio	29
7.3.	Características generales de la materia prima	29
7.4.	Descripción de las condiciones experimentales en el campo electromagnético	29
7.5.	Pretratamiento general aplicado y montaje en reactores	30
7.6.	Caracterización mediante análisis bromatológico elemental de la materia prima para el establecimiento de las condiciones operacionales	32
7.7.	Efecto del pretratamiento y la madurez de la cáscara afectan las variables que definen la producción de jarabe de glucosa	32
7.8.	Porcentaje azúcares reductores con el porcentaje de equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos	34
7.9.	Diseño del experimento	35
7.10.	Análisis estadístico	37
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
8.1.	Caracterización mediante análisis bromatológico elemental de la materia prima para el establecimiento de las condiciones operacionales	38
8.1.1.	Cenizas	38
8.1.2.	Humedad	40
8.1.3.	Color	41
8.1.4.	Fibra	43
8.2.2.	Glucosa	47
8.3.	Porcentaje azúcares reductores con el porcentaje de equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos	49
9.	CONCLUSIONES	52
10.	RECOMENDACIONES	54
	BIBLIOGRAFIA	55

}

RESUMEN

La presente tesis tiene como propósito evaluar la viabilidad de producir jarabe de glucosa a partir de los residuos de plátano, específicamente de su cáscara, proponiendo así una alternativa viable de edulcorante en el mercado nacional. Este estudio pretende aprovechar los desechos generados en la industria del plátano, que a menudo son descartados. La investigación se estructura en varias etapas clave. Se lleva a cabo un proceso de hidrólisis enzimática que transforma los almidones presentes en los residuos de plátano en glucosa. Durante esta fase, se analizan las condiciones óptimas de temperatura y pH, así como se utilizan técnicas de refractometría para maximizar el rendimiento del proceso; además, se evalúan las propiedades fisicoquímicas del producto, incluyendo la concentración de glucosa y su color. Los resultados obtenidos indican que el jarabe de glucosa derivado de los residuos de plátano es competitivo tanto en sus propiedades funcionales como edulcorantes y presenta un costo de producción que podría ser significativamente más bajo gracias a la utilización de estos residuos agrícolas como materia prima. La cáscara del plátano Dominico-Hartón constituye entre el 35% y el 40% del peso total del fruto, lo que representa una cantidad significativa de residuos de que podrían ser utilizados para generar valor agregado. Teniendo en cuenta esta realidad, el presente proyecto se propuso evaluar el potencial de la cáscara de plátano (ya sea verde, madura o sobre madurada) de la variedad Dominico-Hartón como sustrato para la producción de jarabe de glucosa, empleando el hongo *Trichoderma* sp. El hongo *Trichoderma* sp. fue cultivado en diversas mezclas, utilizando las cáscaras de plátano en sus tres estados de madurez, en relaciones de hongo/sustrato de 1/10, 1/20 y 1/30 en peso/ peso, y sometido a campos electromagnéticos de baja intensidad durante 72 horas, con tres réplicas para cada tratamiento. También se dejó un triplicado sin la aplicación de campos electromagnéticos para cada relación hongo/sustrato. Las condiciones experimentales se mantuvieron a una temperatura de 28°C y con una humedad relativa ambiental del 63%. Se llevaron a cabo una serie de análisis, incluyendo la medición del pH por potenciometría, de acuerdo con el método AOAC 981. 12. La cáscara de plátano evaluada presentó un contenido de materia seca del 0. 152%

p/p y una actividad acuosa (A_w) de 0.853, valores que reflejan parte de su composición bromatológica

Palabras clave: plátano, bromatología, glucosa, refractometría, hongo.

ABSCTRACT

The purpose of this thesis is to evaluate the feasibility of producing glucose syrup from banana waste, specifically from its peel, thus proposing a viable alternative sweetener in the national market. This study aims to take advantage of the waste generated in the banana industry, which is often discarded, to create a product that adds value and meets the demands of the food industry, while contributing to sustainability and waste reduction. The research is structured in several key stages. An enzymatic hydrolysis process is carried out that transforms the starches present in the banana waste into glucose. During this phase, the optimal temperature and pH conditions are analyzed, as well as refractometry techniques are used to maximize the process performance. In addition, the physicochemical properties of the product are evaluated, including glucose concentration and color. The results obtained indicate that glucose syrup derived from banana residues is competitive in both its functional and sweetening properties and has a production cost that could be significantly lower thanks to the use of these agricultural residues as raw material. The peel of the Dominico-Hartón banana constitutes between 35% and 40% of the total weight of the fruit, which represents a significant amount of biomass residues that could be used to generate added value. Taking this reality into account, the present project aimed to evaluate the potential of the banana peel (whether green, ripe or overripe) of the Dominico-Hartón variety as a substrate to produce glucose syrup, using the fungus *Trichoderma* sp. The fungus *Trichoderma* sp. was cultivated in various mixtures, using green banana peels (GBP) in fungus/substrate ratios of 1/10, 1/20 and 1/30 in weight/weight, and subjected to low intensity electromagnetic fields for 72 hours, with three replicas for each treatment. A triplicate was also left without the application of electromagnetic fields for each fungus/substrate ratio. The experimental conditions were maintained at a temperature of 28°C and a relative humidity of 63%. A series of analyses were carried out, including pH measurement by potentiometry, according to AOAC method 981. 12. The banana peel evaluated presented a dry matter content of

0.152% w/w and a water activity (A_w) of 0.853, values that reflect part of its bromatological composition.

Keywords: banana, bromatology, glucose, refractometry, fungus

1. JUSTIFICACIÓN

El plátano (*Musa spp.*) una de las frutas más significativas dentro de la canasta básica familiar, especialmente en los países en desarrollo de Asia, Latinoamérica y África (Song, M. B., et al., 2015; Quisbert Zerda, 2021). En Colombia, este cultivo es uno de los principales en el sector agropecuario, abarcando un área sembrada de 378.884 hectáreas y genera una producción de 3.072.974 toneladas. En el departamento del Quindío, el plátano es la principal fuente de economía, con una producción de 221. 929 toneladas y una notable participación del 97,04% en la producción departamental de plátano y tubérculos, lo que representa el 7,22% de la producción nacional (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2013).

A nivel global, Colombia ocupa el séptimo lugar en la producción de plátano, alcanzando un total de 6 millones de toneladas y superando a países como India, Uganda, Brasil, China, Filipinas y Ecuador. De este total, 3,1 millones de toneladas corresponden a la variedad de plátano que pertenece a la familia AAB (Castellanos y Lucas, 2011). Esta cifra ha aumentado, llegando a 3,4 millones de toneladas en 2015, 3,9 millones en 2016, 4,2 millones en 2017 y alcanzando los 4,3 millones de toneladas en 2018 (Ministerio de Agricultura, 2018). Así, Colombia se sitúa como el cuarto país en producción y extensión de cultivos de plátano.

La cáscara del plátano representa el 31,51% del peso total de la fruta. Esto nos permite estimar que, de los 4,3 millones de toneladas de banano producidas en Colombia en 2018, entre 1,4 y 1,6 millones de toneladas correspondieron a cáscaras que, lamentablemente, terminaron en la basura. (Green, B., & White, C; 2020.)

De acuerdo con Quiceno, Giraldo y Villamizar (2014), las características fisicoquímicas del plátano en el momento de la cosecha son las siguientes: 66,2% de agua, 0,3% de grasa, 1,3% de proteínas, 1,1% de fibra, 0,8% de vitaminas y cenizas, y 30,7% de carbohidratos. Estos carbohidratos se encuentran

principalmente en forma de almidón en los frutos verdes y como azúcares invertidos en los maduros. Además, el almidón se considera un biopolímero de valor industrial, compuesto por la amilosa y la amilopectina (Wang et al., 2015). Es reconocido como una de las principales fuentes de alimento para los seres vivos y es fundamental en la producción de energía (Huang et al., 2015). Este recurso es abundante, sostenible, biodegradable a través de procesos biológicos. Se obtiene de diversas fuentes naturales, como raíces, granos, legumbres y frutas verdes, y, al descomponerse, puede dar lugar a productos más rentables (Li et al., 2015).

Aparicio-Saguilán et al. (2014) destacan en su investigación el creciente interés por la obtención de almidón o jarabe de glucosa a partir de fuentes no tradicionales, aprovechando residuos como subproductos. Esto se debe a que podrían presentar propiedades diferentes a las de los almidones convencionales, como los derivados de cereales y papa. Esta observación ya había sido mencionada anteriormente por Utrilla-Coello et al. (2014), quienes evaluaron las propiedades fisicoquímicas, estructurales y funcionales de almidones extraídos de diversas variedades de plátano, así como su digestibilidad. Por otro lado, Bello-Pérez et al. (2002) y Aparicio-Saguilán et al. (2014) lograron modificar almidones a través de la descomposición, utilizando métodos enzimáticos y ácidos. Los investigadores concluyeron que, gracias a sus cualidades y características, los almidones obtenidos de esta fuente pueden ser empleados en la creación de nuevos productos, especialmente como ingredientes innovadores con propiedades nutraceuticas, además de representar una fuente importante de energía.

2. PROBLEMÁTICA

En la actualidad, la industria alimentaria se enfrenta un desafío de encontrar alternativas saludables y sostenibles que reemplacen a los edulcorantes convencionales. La necesidad de sustituir los azúcares refinados ha impulsado la investigación de opciones naturales y económicamente viables, como señalan Wang y Chen (2019). En este contexto, la glucosa emerge como uno de los principales productos en el proceso de industrialización del plátano, y la cáscara se convierte en un subproducto clave. Esto plantea la necesidad de aprovechar y desarrollar compuestos de valor añadido a partir de este residuo. En particular, este subproducto se valora en el mercado como una alternativa que puede ayudar a satisfacer la demanda de energía, ya sea para combustibles o para la alimentación de seres humanos y animales (Chen et al., 2015). Así, se requiere un análisis de opciones que sean económicamente viables y respetuosas con el medio ambiente, con el fin de estandarizar los procesos de producción. Entre las diversas alternativas, la cáscara de plátano se presenta como una opción atractiva gracias a su bajo costo y facilidad de producción, de acuerdo con lo señalado por Macías y Zambrano (2023).

En este contexto, la investigación en la industria agroalimentaria relacionada con la extracción de azúcares de las cáscaras de plátano se presenta como una opción altamente prometedora. Estas cáscaras pueden transformarse en una valiosa fuente de energía o edulcorante tanto para alimentos humanos como para animales, al permitir la obtención de una cantidad considerable de azúcares naturales, como la glucosa y la fructosa.

En Colombia, se cuenta con más de 400. 000 hectáreas dedicadas al cultivo de plátano, cuyo rendimiento promedio es de 6,1 toneladas por hectárea. Sin embargo, es notable que la cáscara representa entre el 35 % y el 40 % del peso del fruto, lo que genera una cantidad significativa de desechos. Esta situación

plantea una oportunidad para aprovechar esos desechos en la producción de productos valiosos, como la extracción de almidón, que podría ser utilizado en la industria alimentaria (Macías JV; 2023).

En el anterior contexto, esta propuesta pretenderá dar solución a la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué influencia ejerce el pretratamiento y el estado de madurez de la cáscara sobre rendimiento del jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* spp) variedad Dominico Hartón?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del pretratamiento y el estado de madurez de la cáscara sobre rendimiento del jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática partiendo de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* spp.) variedad Dominico Hartón.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las condiciones operativas a través de un análisis elemental de la composición de la materia prima con respecto a la alimentación.
- Examinar cómo el pretratamiento y la madurez de la cáscara afectan las variables que definen la producción de jarabe de glucosa.
- Establecer el porcentaje de azúcares reductores con el porcentaje de equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos.

4. MARCO TEÓRICO

Existen 2 variedades de plátano hartón en Colombia cultivadas en diversas zonas agroecológicas del país. Los principales centros de producción de plátano se localizan en la región andina, que aporta el 50% de la producción nacional. En menor medida, también se cultiva en las regiones del Caribe, Pacífico y Orinoquia.

4.1. Biomasa lignocelulósica

La biomasa se puede definir como un conjunto de materia orgánica renovable que proviene de plantas y animales (Ana y Flor, 2014). Está compuesta por polímeros de carbohidratos estos contienen monómeros de azúcar y están unidos a la lignina, esto representa entre el 30 y 50% de biomasa; los polímeros presentes están compuestos por xilosa, glucosa, manosa y arabinosa. La biomasa se usa para la producción de bioetanol por medio de fermentación, fabricación de papel y de celulosa para la producción de esto se hace extracción de la lignina y partes celulósicas. A partir de la biomasa también se puede generar productos químicos como furfural, ácido levulínico adicional se puede fabricar aditivos para los combustibles. (Espinosa, A; 2022)

4.2. Biomasa Natural

Esta incluye todo aquel material que se genera de forma espontánea en el entorno natural, como los bosques, árboles y matorrales. Esto es una fuente de energía ya que se hace el ciclo del carbono de absorber el dióxido de carbono durante el crecimiento y se libera al ser quemado. Este proceso de quema y generación de dióxido de carbono se puede generar electricidad donde puede llegar mover turbinas, los residuos pueden ser reutilizados para fabricar fertilizantes. (Espinosa, A; 2022)

4.3. Biomasa de cultivos energéticos

Se refiere a las tierras dedicadas exclusivamente al cultivo de especies destinadas a la producción de energía. Este abarca varios como los leñosos donde sus cosechas son de un plazo máximo de 5 años, herbáceos este cultivo comprende el maíz y hierbas que pueden generar biogás a partir de digestión anaerobia; cultivo alcoholígeno este es por medio de producción de bioetanol y el proceso de fermentación de azúcares. (Espinosa, A.; 2022)

La función de estos cultivos es transformar todo en combustibles para la generación de energía térmica o eléctrica, estas plantas absorben el dióxido de carbono durante su germinación donde reducen el efecto invernadero.

4.4. Residuos de biomasa

Comprenden aquellos desechos generados por actividades humanas, como desechos agrícolas y forestales hasta residuos industriales biodegradables. La materia orgánica es fundamental para la producción de biocombustibles y productos químicos. En particular, los desechos lignocelulósicos, como la paja, los tallos y el bagazo, presentan un gran potencial, ya que no compiten con la alimentación animal ni con la industria alimentaria. (Espinosa, A; 2022)

4.5. El almidón

El almidón es considerado un carbohidrato de reserva, que produce y almacena en plantas superiores como una fuente de energía. Este compuesto tiene numerosos usos en la industria alimentaria, como fabricación de papel, adhesivos y envases biodegradables. Es el polisacárido más utilizado como ingrediente funcional como espesante, estabilizante y gelificante (Rivera, 2017). La eficacia de este carbohidrato depende del peso molecular promedio de la amilosa y la

amilopectina, así como de la estructura molecular de estos glucanos dentro del gránulo (Hoyos, 2015).

El almidón está conformado por dos tipos de polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina, los cuales se organizan en anillos concéntricos para formar su estructura granular. La amilopectina es la que proporciona la estructura cristalina del almidón, mientras que la amilosa se distribuye de manera diferenciada en el centro y en la periferia del gránulo. En términos generales, se trata de un polímero de condensación de glucosa compuesto por átomos de C6, H10 y O5, que se encuentra en estado granular en semillas, tubérculos y raíces. Además, la forma y el tamaño del gránulo varían dependiendo del tipo de grano. La composición del almidón no es uniforme; la mayoría de los tipos contiene amilosa y amilopectina en distintas proporciones (Guacho-Abarca, 2014).

En la industria, los polisacáridos pueden clasificarse según sus áreas de aplicación, que incluyen el uso de polímeros en la industria alimentaria, el tratamiento de aguas, la cosmética, productos dietéticos, agricultura, biomedicina, química analítica, farmacéutica, entre otros. Las pectinas son combinaciones complejas de polisacáridos, las cuales se han utilizado en la industria farmacéutica como agentes antidiarreicos y desinfectantes. Esto se debe a su capacidad para adsorber y secuestrar macromoléculas pépticas, lo que a su vez permite la inhibición de toxinas (Sriamornsak, 2003).

Algunos estudios sugieren que la pectina puede disminuir la resistencia a la glucosa en personas con diabetes y contribuir a la reducción de los niveles de colesterol en sangre. Además, se le atribuyen beneficios potenciales en la prevención del cáncer y en la inhibición de su propagación. En la actualidad, se están realizando investigaciones enfocadas en su posible uso en la lucha contra el cáncer de próstata (Zhang, Xu y Zhang, 2015).

Además, se emplea como un excipiente que protege ingredientes activos, resguardándolos de la acción de la membrana estomacal (Neufeld y Bianco-Peled, 2017). Sin embargo, su aplicación como macromolécula para el transporte de principios activos nano encapsulados presenta ciertas desventajas, como su inestabilidad a lo largo del tiempo y su reacción ante variaciones de pH. También se ha encontrado que no se descomponen en el colon ni son digeridas por las enzimas gástricas e intestinales (Neufeld y Bianco-Peled, 2017), lo que limita su uso en el ámbito farmacéutico y en la nanomedicina. Por ello, continúa siendo objeto de investigación para explorar sus posibles aplicaciones en estos campos.

4.6. La amilosa

La amilosa es un polímero de glucosa que se presenta en un 20% a 30% dentro de un almidón. Su síntesis se lleva a cabo mediante la acción catalizadora de la isoforma del almidón sintasa (Glicerio León-Méndez, 2020). Tiene una estructura tridimensional en forma de hélice, donde cada hélice está formada por 6 moléculas de glucosa. En su interior se encuentran átomos de hidrógeno, lo que permite que los grupos hidroxilo queden expuestos en el exterior. Cada molécula de amilosa puede conectarse a entre 300 y 3000 unidades de glucosa (Glicerio León-Méndez, 2020).

4.7. La amilopectina

La amilopectina es un polisacárido formado por moléculas de glucosa que se unen a través de enlaces de tipo α , creando una estructura ramificada que impide la formación de una hélice. Este compuesto constituye aproximadamente el 80% de la mayoría de los almidones (Bernal, Lilia; 2006). Como carbohidrato de alto peso molecular, la amilopectina presenta una baja osmolaridad, lo que facilita la absorción de agua en las células de nuestro organismo y contribuye de manera significativa al suministro de fluidos en el torrente sanguíneo. Además, la amilopectina se caracteriza por una rápida tasa de llenado de los depósitos de

glucógeno, superando la eficiencia de otros carbohidratos como la dextrosa, la glucosa y la maltodextrina. (Macias

4.8. Enzimas

Su actividad catalítica permite a las enzimas mantener su correcta conformación, lo que les habilita para llevar a cabo una amplia variedad de reacciones químicas en diversos organismos. En su estructura tridimensional, se crean sitios activos que tienen afinidad por moléculas específicas, las cuales se transformarán en productos. (Luis Franco Vera; 2007)

Las enzimas son la clase de moléculas proteicas más abundante. Constituyen los principales instrumentos mediante los cuales los genes ejercen su función, formando así el metabolismo intermedio de las células. (Luis Franco Vera; 2007)

4.9. α -amilasa

La amilasa cataliza la reacción de hidrólisis que rompe los enlaces entre las unidades de glucosa, fragmentándolas en partículas más pequeñas. Su actividad óptima se encuentra en un pH de 6,9 y es importante destacar que la mayoría de los seres vivos poseen esta enzima. Sin embargo, es importante mencionar que una amilasa salival con alta afinidad por los enlaces alfa 1-4, ubicados en el centro de las cadenas de polisacáridos, y una afinidad muy baja por los enlaces situados en los extremos, no es capaz de liberar glucosa libre (López González, S. 2022).

Las amilasas son enzimas que requieren la presencia de calcio para funcionar adecuadamente. Actúan a lo largo de la cadena de carbohidratos, descomponiéndolos en dextrina a partir de la amilopectina. Gracias a su capacidad para actuar en cualquier parte de la cadena, la amilasa es más rápida que la β -amilasa. En el ámbito animal, esta enzima es fundamental en el proceso

digestivo, y su rango de acidez ideal oscila entre 6,7 y 7,2. (López González, S. 2022).

4.10. Jarabe de glucosa

Los jarabes de glucosa son subproductos que se obtienen a partir de la descomposición del almidón, ya sea mediante procesos ácidos o enzimáticos. Esta bioconversión da lugar a jarabes que presentan diversas características en términos de dulzor, sabor y textura. Abarca una amplia gama de productos según su contenido de mono, di, tri y polisacáridos. Su clasificación se realiza en función de los DE (Equivalentes de Dextrosa). Estos jarabes son muy apreciados en la industria alimentaria, donde se utilizan como endulzantes y poseen distintos niveles de glucosa, maltosa y oligosacáridos de glucosa. (Quitiguiña, Carla; 2012)

4.11. La glucosa

La glucosa es uno de los monosacáridos más abundantes, especialmente la D-glucosa, gracias a su presencia en cadenas poliméricas de materiales que se encuentran fácilmente en la naturaleza. Estos materiales se unen mediante enlaces alfa 1,4 y 1,6, así como enlaces beta. (Nelson, D; 2017))

Con una fórmula química de $C_6H_{12}O_6$, la glucosa se presenta también en forma de disacárido, formada por fructosa. Es un tipo de azúcar que se encuentra en las frutas y en la miel, y su eficiencia energética es de 3,75 calorías por gramo en condiciones normales. La glucosa es un isómero de la galactosa, pues la posición relativa de sus grupos -OH y =O es diferente. (Berg, J. M; 2015)

Este monosacárido es la fuente principal de energía para las células, ya que su oxidación catabólica genera la energía necesaria. Así mismo, la glucosa es un componente esencial de polímeros estructurales como la celulosa, así como de

polímeros que almacenan energía, como el almidón y el glucógeno. (White, C; 2009).

La producción de glucosa implica procesos como la sacarificación, la gelatinización y la licuefacción del plátano. Este proceso requiere un calentamiento que puede afectar los enlaces de hidrógeno presentes. La absorción de agua es facilitada por la hinchazón del almidón, lo que proporciona una mejor compatibilidad con enzimas o catalizadores ácidos. Sin embargo, el uso de ácido puede influir en el nivel de glucosa y el contenido de nutrientes, elementos regulados por la norma técnica colombiana 610, que establece límites en la ceniza máxima y las concentraciones de sulfato y dióxido de azufre, fijándolas en 0.8 y 40 partes por millón, respectivamente. (Dey, A; 2020).

4.12. Hidrolisis

La hidrólisis es una reacción química en la que se rompen enlaces en una molécula gracias a la adición de agua. Durante este proceso, los átomos presentes en las moléculas de agua se incorporan para formar nuevos enlaces químicos con la sustancia que interactúa con el agua. Esta reacción es de gran relevancia, ya que el agua es el disolvente más utilizado en todo el mundo. (Ghosh, D; 2017)

4.13. Campos electromagnéticos

Son campos eléctricos y magnéticos combinados estos se producen de forma natural o por el ser humano, por medio de una oscilación y una aceleración de las cargas eléctricas generadas. (López; 2019)

- Campo eléctrico: Este es creado por una fuerza debido a una atracción de la repulsión de cargas eléctricas, la carga eléctrica se

mide en voltios y su flujo decrece con la distancia desde la fuente donde se origina el campo.

- Campo magnético: El campo es asociado con cargas en movimiento (corriente eléctrica). Este campo tiene dirección que sigue la regla de la mano derecha y se mide en teslas (T)

4.14. Efectos de los campos electromagnéticos sobre la molécula de agua

Los efectos pueden verse reflejados en la parte física, química y biológicamente

- Efectos físicos

Polaridad: los campos electromagnéticos afectan la orientación de las moléculas de agua, donde se genera un di polaridad debido a las cargas eléctricas que tienen los átomos de oxígeno e hidrogeno. (López, Nuria; 2019); las propiedades modificadas son la tensión superficial y la conductividad eléctrica.

- Efectos químicos

iones: el campo electromagnético influye en la hidratación de los iones están en el agua lo que afecta la cinética de los procesos físico -químicos. Los campos electromagnéticos influyen en la formación de cristales de carbonato cálcico. En lugar de formar calcita, que es más dura y adherente, el tratamiento electromagnético promueve la formación de aragonito, que es más blando y fácil de eliminar. (Insua, Alfonso;2009)

4.15. Sistemas biológicos

Los sistemas biológicos se componen de una intrincada organización de moléculas que se unen de manera armónica para dar origen a la célula, que constituye la unidad fundamental de la vida. Todas las células contienen los elementos necesarios para llevar a cabo funciones vitales e interactuar,

resultando en un organismo único, organizado y complejo. Por ejemplo, las moléculas que forman la masa de las células humanas están compuestas por una variedad de elementos, entre los que sobresalen: el oxígeno (O) que representa el 65%, el carbono (C) con un 18%, el hidrógeno (H) que alcanza el 10% y el nitrógeno (N) que constituye el 3%. Juntos, estos elementos constituyen el 96% de la masa celular, mientras que el 4% restante está formado por calcio, fósforo, azufre, potasio, sodio, magnesio, entre otros. (Alquezar Facca, C. 2022)

4.16. Fermentación

La fermentación es un proceso metabólico que ocurre en ausencia de oxígeno, durante el cual microorganismos como bacterias y levaduras descomponen sustancias orgánicas, principalmente azúcares, para obtener energía. Este proceso implica la descomposición parcial de moléculas complejas en compuestos más simples, tales como ácidos orgánicos, alcoholes o gases. La fermentación es fundamental para la producción de energía cuando no hay oxígeno disponible. (Lehninger, A. L. 2014).

4.16.1. Fermentación anaerobia

La fermentación es un proceso metabólico que ocurre en ausencia de oxígeno, durante el cual microorganismos como bacterias y levaduras descomponen sustancias orgánicas, principalmente azúcares, para obtener energía. Este proceso implica la descomposición parcial de moléculas complejas en compuestos más simples, tales como ácidos orgánicos, alcoholes o gases. La fermentación es fundamental para la producción de energía cuando no hay oxígeno disponible. (Alberts, B; 2010)

4.16.2. *Trichoderma viride*

Las variedades de *Trichoderma* se consideran agentes de control biológico debido a varias características que destacan en su biología. Su notable capacidad reproductiva, la habilidad de sobrevivir en condiciones ambientales adversas y su eficiencia en la utilización de nutrientes son fundamentales para su éxito. Además, *Trichoderma* tiene la capacidad de alterar la rizosfera, actuando de forma agresiva contra hongos fitopatógenos y desempeñando un papel eficaz en el fomento del crecimiento vegetal, así como en la inducción de mecanismos de defensa. (Bubici G; 2019)

Las diferentes especies se caracterizan por un rápido crecimiento micelial y una alta producción de esporas, lo que facilita su colonización en diversos sustratos y en el suelo. Las colonias se desarrollan con rapidez y esporulan a 30°C en un periodo de cinco días cuando se cultivan en Agar de Sabouraud. Inicialmente, estas colonias presentan una textura algodonosa, pero con el tiempo se compactan y comienzan a esporular, adquiriendo un característico color verde y una textura granular, que se organiza en parches concéntricos. (Bubici G; 2019)

5. ANTECEDENTES

En la literatura se detalla el uso de desechos sólidos, semisólidos y líquidos en la industria, orientado a la creación de productos, la producción de bioenergía y la reducción de su impacto ambiental (Mejías-Brizuela et al., 2016). Una de las opciones más comunes es aprovechar los residuos agroindustriales como materia prima económica para la fabricación de sustancias químicas refinadas (Quisbert Zerda, 2021). Este enfoque revela un interés creciente por la reutilización de desechos y el aprovechamiento de materias primas residuales, también denominadas no convencionales, en la generación de nuevos productos, promoviendo así la sostenibilidad del planeta (Hernández et al., 2015). Los desechos en cuestión se conocen como biomasa lignocelulósica (Mejías-Brizuela et al., 2016), y se caracterizan por ser biodegradables, renovables y representar una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Arellano, 2015). Según Conesa (2017), los residuos de frutas se consideran un recurso valioso para diversas aplicaciones, incluyendo la producción de biocombustibles.

En particular, las cáscaras de plátano, un subproducto derivado del consumo o procesamiento de esta fruta, pueden utilizarse para generar productos con valor añadido, tanto ambiental como económico. Estas cáscaras contienen componentes como celulosa, hemicelulosa y lignina, donde las hacen mayormente inapropiadas para el consumo humano, son ideales para la creación de otros productos valiosos (Ramos, Valentina, 2016).

En la Universidad Alas Peruanas (UAP), se llevó a cabo un estudio sobre la obtención de jarabe de glucosa mediante hidrólisis enzimática, lo que permitió evaluar económicamente los residuos de plátano. Se determinaron las mejores condiciones de temperatura y pH para conseguir la máxima concentración de jarabe de glucosa a partir del almidón presente en las cáscaras de plátano. El proceso de secado se realizó a 30°C durante 10 horas, logrando una humedad de 0,06 en base seca. Bajo estas condiciones, se analizó la cinética de la hidrólisis,

hallando una constante de Michaelis-Menten (K_m) de $-20,3666$ g/m y una velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x}$) de $0,03462$ g/mL·min, con un rendimiento máximo del sustrato del 32,96%. Este estudio confirma que el almidón de cáscara de plátano tiene un potencial significativo como fuente para la producción de jarabe de glucosa.

Por su parte, la Universidad Le Cordon Bleu en Lima, Perú, investigó el impacto de la aplicación de la enzima celulasa fúngica en la obtención de jarabe glucosado. Esta investigación se realizó utilizando una concentración del 30% p/v y manteniendo una temperatura constante de 50°C . Se establecieron variables de control de la enzima en proporciones de 0,5%; 1%; y 1,5%, aplicadas durante tiempos de 18, 24 y 30 horas. Este estudio empleó un diseño factorial de 32, revelando que la mayor concentración de azúcar reductor y dextrosa se obtenía con una concentración de 1,5% p/v durante 30 horas de hidrólisis, promediando un 15,5% de azúcar reductor y un 30,9% de dextrosa.

6. MARCO LEGAL

En Colombia, la producción de jarabe de glucosa a partir de la cáscara de plátano hartón se enmarca dentro de varias normativas legales que regulan tanto la seguridad alimentaria como la sostenibilidad de los recursos naturales. Entre las normativas clave se incluyen las establecidas por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA), que regula la seguridad de los productos alimenticios en el país, y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, que promueve el uso de recursos agrícolas de manera sostenible.

Decreto 3075 de 1997, el cual establece los requisitos de buenas prácticas de manufactura (BPM) para la industria alimentaria, garantizando que los productos alimenticios elaborados en el país cumplan con los estándares de higiene, calidad y seguridad. Este decreto es fundamental para la producción de cualquier tipo de jarabe alimenticio, incluidas las alternativas obtenidas de materias primas no convencionales como la cáscara de plátano.

Codex Alimentarius colombiano (Ley 9 de 1979), expresado como un conjunto de normas internacionales que establece directrices y estándares para la seguridad y calidad de los alimentos a nivel global. Las principales áreas que cubre el Codex Alimentarius incluye: Establecer criterios para la inocuidad de los alimentos, como límites para residuos de pesticidas, metales pesados, y contaminantes microbiológicos. Este regula el uso de aditivos como colorantes, conservantes y otros ingredientes añadidos a los alimentos, asegurando que se utilicen de manera segura y adecuada. Así mismo, establece pautas para la producción, procesamiento y manipulación de alimentos para garantizar que se sigan las mejores prácticas y se minimicen los riesgos para la salud.

Resolución 1407 de 2022. Se establecen los criterios microbiológicos que deben cumplir los alimentos y bebidas destinados para consumo humano.

Conpes 3874 de 2016. Decreta mejorar la gestión sectorial para la disminución de impactos ambientales y en la salud asociados al desarrollo económico; dentro de éste se señala que, en términos de gestión de residuos sólidos se desarrollará políticas y regulaciones orientadas a fortalecer la gestión de estos residuos a través de modelos regionales que generen economías de escala e incentiven inversiones en sistemas adecuados de aprovechamiento y disposición final.

Resolución 3929 de 2013. Establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir las frutas y las bebidas con adición de jugo (zumo) o pulpa de fruta o concentrados de fruta, clarificados o no, o la mezcla de estos que se procesen, empaquen, transporten importen y comercialicen en el territorio nacional.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se evidencia la metodología a seguir para dar cumplimiento a los objetivos planteados:

7.1. Tipo de Investigación

Este proyecto se basó en un enfoque de investigación experimental y descriptiva – correlacional, para la evaluación de la producción de jarabe de glucosa extraída de residuos de plátano como alternativa edulcorante en el mercado nacional.

En tal sentido, se llevaron a cabo 54 tratamientos bajo condiciones semicontroladas para extraer el jarabe de glucosa de manera eficiente a partir de los residuos de plátano. Por otra parte, en consonancia con lo anterior, se siguió un enfoque mixto el cual permite una comprensión profunda de la eficiencia del proceso, así afectan la integración de los factores el rendimiento y calidad del jarabe de glucosa obtenido como se muestra en la figura1. Es de resaltar que como elemento novedoso al proceso se le incluye el tratamiento de la harina con campos electromagnéticos.



Figura 1. Reactores con digestión anaerobia

Fuente: propia

7.2. Ubicación en tiempo y espacio

El proyecto se realizó en las instalaciones de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA, localizada en el departamento de Cundinamarca, ciudad de Bogotá D.C, Localidad de Suba, a una altitud de 2650 metros sobre el nivel del mar, humedad relativa promedio 70% y una temperatura que oscila entre los 10°C y 20°C. Los requerimientos y equipos que se utilizarán son suministrados por la institución.

7.3. Características generales de la materia prima

Para el desarrollo del proyecto se adquirieron tres racimos de plátanos (verde, maduro y sobre maduro) de tipo Hartón *Musa paradisiaca* del cual se obtendrá la cáscara para ser utilizada como materia prima para la extracción del jarabe de glucosa después de un proceso previo de lavado e inactivación enzimática, con sus respectivos pretratamientos.

7.4. Descripción de las condiciones experimentales en el campo electromagnético

Para el proceso de inducción de campos electromagnéticos de baja intensidad se emplea bobinas, las cuales llevan una carga de Voltios (V) y Amperios (A), con un capacitador eléctrico. Para poder lograr las intensidades experimentales se aplicó el diseño citado por Suárez-Rivero, et al. (2017) y que se describe a continuación. Con base a lo anterior, se conformó un circuito con bobinas de 3,5 cm de altura y 3000 espiras respectivamente. Las bobinas para usar son de alambre de cobre con un diámetro del filamento del embobinado de 0,191 mm para la bobina de 3000 espiras; así mismo se emplea en el montaje fuente de alimentación dual (garantizan corriente continua) empleando conexiones entre las fuentes y las bobinas con cables tipo banana - caimán, generando una corriente (i) y un voltaje de 28,0 V (en bobina de 3000 espiras). La intensidad del campo se verifica con el sensor *Magnetic Field* acoplado a una interfase GLX Xplorer. Las bandejas con la

harina (dispuesta en forma laminar para tener una inducción de Campos Electromagnéticos - CEM a toda la superficie homogénea se fijó en 1 cm de espesor) colocados en la parte superior de las bobinas a una distancia de 2 cm respecto al borde superior de la misma y con las líneas de CEM saliendo del embobinado (verificado con el sensor *Magnetic Field*) y se emplea una brújula para el establecimiento del sentido de las líneas del campo.

7.5. Pretratamiento general aplicado y montaje en reactores

Luego de lavada la materia prima y desinfectada, las cáscaras se cortan con tamaño de partícula aproximadamente de 1 cm² y puestas en estufa de secado de recirculación forzada a 40 °C durante 48 h. Luego del secado, se procede a la molienda en una licuadora haciendo una trituration de 1 minuto con intervalos de 1 minuto. Una parte de la harina obtenida es sometida por 24 h a tratamiento electromagnético de 118 μT por 24 h continuas, con la finalidad de establecer si este factor externo afecta la calidad del jarabe obtenido.

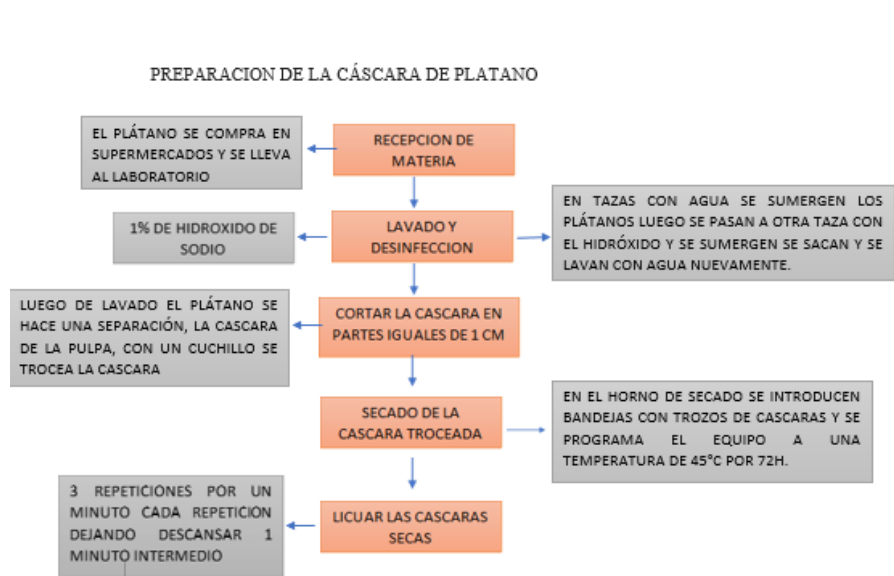


Figura 2. Preparación de la cáscara

Fuente: propia



Figura 5. Cáscara de plátano después de 48 horas en horno de secado.

Fuente: propia

7.6. Caracterización mediante análisis bromatológico elemental de la materia prima para el establecimiento de las condiciones operacionales

Para dar cumplimiento a esta actividad se realizó las siguientes determinaciones:

- Humedad. Método AOAC-934.01. 1990. NMX-F083-S-1986.
- Fibra Dietética. Método enzimático de Prosky et al. 1998. Suma de Soluble e Insoluble.
- Cenizas. Método AOAC-962.02. 1990. NMX-F-607-NORMEX-2013
- Carbohidratos. Se obtendrá por diferencia.
- Color. Colorímetro Konica Minolta.

7.7. Efecto del pretratamiento y la madurez de la cáscara afectan las variables que definen la producción de jarabe de glucosa.

La digestión enzimática se llevó a cabo utilizando biodigestores con sustratos de 10, 20 y 30 % (p/v). En este sentido, la cáscara de plátano triturada, junto con los tres niveles de madurez y las dos estimulaciones electromagnéticas en la harina, se colocaron en biorreactores aeróbicos de 100 mililitros, recipientes donde se

mezclará el material con agua destilada. Durante el experimento, la suspensión se sedimentada en reposo durante 3 días antes de analizar el pH y la concentración de glucosa a las 24, 48 y 72 horas desde el inicio del experimento.

Procedimiento de hidrólisis: los tanques de fermentación inoculados con 0,4 g/L de esporas de *Trichoderma viride* se mantuvieron a temperatura ambiente (28 °C) durante 3 días (72 horas), midiéndose la concentración de glucosa diaria tras filtrar 10 mL de la muestra.

Para activar la cepa con 5 días anteriores se realizó:

- Limpieza y desinfección del laboratorio de microbiología
- Limpieza y desinfección de la cámara y utensilios como el asa
- En una caja Petri con agar Sabouraud y caldo Sabouraud en un tubo de ensayo se hace la siembra a temperatura de 22,5 °C (ver figura 6).
- Esto solo se activa para hongos. La *Trichoderma viride* es un polvo fino de color verde.
- Se incuba por 5 días en incubadora
- Se saca de incubación y se mantiene en refrigeración

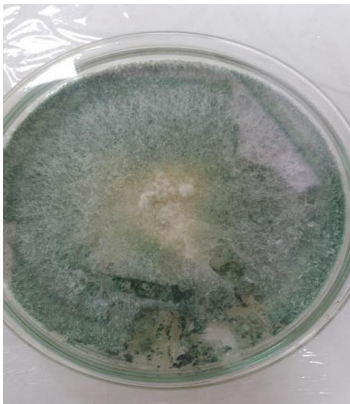


Figura 6. *Trichoderma esporulada* en caja Petri activada en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Fuente: propia

La medición del pH se llevó a cabo en los biodigestores mediante la inserción del electrodo del medidor multiparámetro (pH) TIPO ORION STAR A329 digital.

La glucosa se determinó utilizando el método de ácido 3,5-dinitrosalicílico por espectrofotometría UV-visible, con glucosa como estándar, según lo indicado por Miller. El método se basó en la reducción del ácido 3,5-dinitrosalicílico a ácido 2-amino-5-nitrosalicílico por los azúcares reductores, resultando en un color naranja cuya intensidad está relacionada con la concentración de grupos reductores, con máxima absorción a 540 nm.

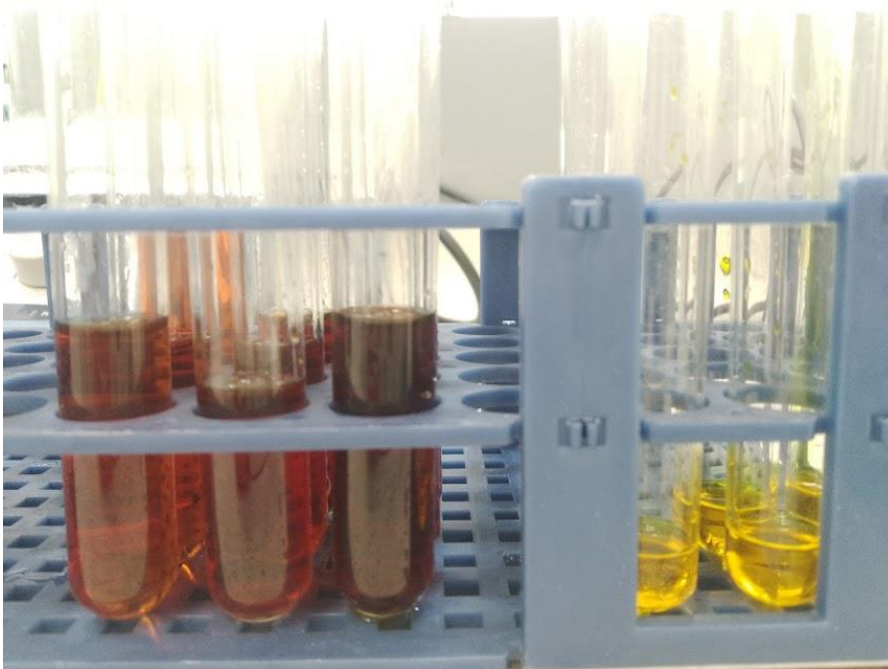


Figura 7. Tubos de ensayo con muestra y ácido, tubos de ensayo sin muestra de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Fuente: propia

7.8. Porcentaje azúcares reductores con el porcentaje de equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos

Para dar respuesta a este ítem, se evaluó, como se referencia a continuación, el porcentaje de azúcares reductores y el porcentaje de equivalentes de dextrosa.

Así:

- A) Prueba de determinación de porcentaje de azúcares reductores

Para la determinación cuantitativa del contenido de azúcares reductores se realiza por el método volumétrico de Eynon-Lane (INDEC gvcfxOPI NTP 203.OO2-1979 y INDECOPI NTP 208.102:2014).

b) Prueba de determinación de porcentaje de equivalente de dextrosa (ED).

La cuantificación de ED se realizará tomando como base los azúcares reductores y la cantidad en sustancia seca de la muestra de jarabe utilizada. Para obtener el porcentaje de extracto seco (% ES), de 100 se restará el porcentaje de humedad (INDECOPI. NTP 209.264. 2001) del jarabe, es decir:

$$\% \text{ ES} = 100 - \% \text{ humedad de la muestra de jarabe}$$

7.9. Diseño del experimento

El modelo estadístico será un experimento factorial 3x3x2 completamente al azar en condiciones de temperatura constante, en donde por cada factor se multiplicó los tres niveles a evaluar, dando así un total de 18 tratamientos. Todos los tratamientos tendrán una concentración de inóculo de 0,4 g/L de conidias del hongo *Trichoderma viride*.

Tabla 1. Diseño factorial 3 x 3 x 2

	1:10		1:20		1:30	
Cáscara verde	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético
Cáscara madura	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético
Cáscara sobre madurada	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético	Con campo electromagnético	Sin campo electromagnético

✓ *Hipótesis del diseño experimental*

H₀= Los campos electromagnéticos en combinación con el estado de madurez del plátano tienen efecto positivo sobre la producción de jarabe de glucosa.

H₁= Los campos electromagnéticos en combinación con el estado de madurez del plátano no tienen un efecto marcado sobre la producción de jarabe de glucosa.

Variables independientes:

- Estado de madurez del plátano (horas)
- Intensidad del campo magnético (μT)
- Concentración de la harina en biorreactor

Variables dependientes

- Rendimiento en jarabe
- pH
- Concentración de glucosa

✓ *Factores*

Factor A. Intensidad del campo electromagnético

- Intensidad 118 μT
- Sin inducción artificial

Factor B. Estado de maduración del plátano

- Verde (grado 2 o de madurez comercial)
- Maduro (grado 5 o de madurez ideal de consumo)
- Sobre maduro (grado 7 o no apto para consumo)

Factor C. Concentración de la harina en biorreactor

- 10 % harina de cáscara de plátano hartón
- 20 % harina de cáscara de plátano hartón
- 30 % harina de cáscara de plátano hartón

7.10. Análisis estadístico

Se utiliza una estadística descriptiva mediante análisis de bloques al azar. La varianza de los datos experimentales se obtiene mediante la utilización del software Origin 5.0. Se utiliza una estadística inferencial para estimar la significancia entre los tratamientos estudiados, así como la correlación de los factores respecto a las variables respuesta. Se realiza un análisis multifactorial con prueba de Duncan; para ello se utiliza el programa estadístico Statgraphics Plus.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados para la evaluación del efecto del pretratamiento y el estado de madurez de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* spp.) variedad Dominico Hartón, sobre el rendimiento del jarabe de glucosa obtenido mediante hidrólisis enzimática. Es de resaltar que, tal como se explica en el capítulo anterior, se consideraron diferentes condiciones de pretratamiento y estados de madurez de la cáscara, con el fin de determinar cómo estos factores afectan la eficiencia en la conversión de los carbohidratos presentes en la cáscara en glucosa. Los resultados obtenidos se discuten en función de los rendimientos alcanzados, la influencia del pretratamiento sobre la accesibilidad del material y el impacto del grado de madurez de la cáscara en la calidad y cantidad del jarabe producido, lo cual podría contribuir a optimizar el proceso de producción de jarabe de glucosa a partir de un recurso agrícola subutilizado.

8.1. Caracterización mediante análisis bromatológico elemental de la materia prima para el establecimiento de las condiciones operacionales

A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los componentes del análisis bromatológico descritos en la metodología.

8.1.1. Cenizas

El análisis de cenizas se realizó siguiendo el método gravimétrico estándar, donde se sometió una muestra de la cáscara de plátano en sus tres estados de madurez a una temperatura controlada en horno. Los resultados obtenidos, tal como reflejan en la figura 8, indicaron un contenido de cenizas para la cáscara de harina verde 77,73%; cáscara de harina madura 40,74%; cáscara de harina sobre madura 38,70%. En el contexto anterior, los resultados evidenciaron para el contenido de cenizas hay una diferencia significativa entre el porcentaje de cenizas de la cáscara verde respecto a las maduras y ; estas dos últimas no difieren entre sí.

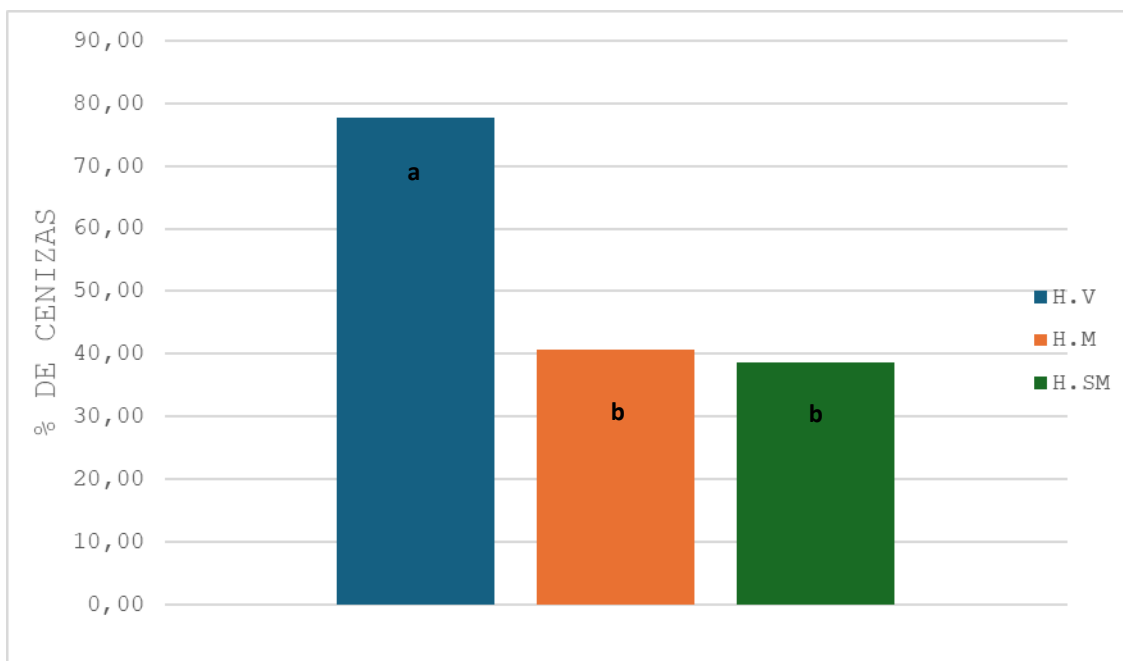


Figura 8. Porcentaje de cenizas en las harinas de cáscara según estado de madurez.

Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

Al comparar estos resultados con los que plantean estudios recientes, se puede apreciar que la cáscara de plátano verde debería contener un mayor porcentaje de minerales, traducidos en cenizas, ya que durante su proceso de maduración y los minerales como el potasio y el calcio pueden ser translocados hacia el interior de la pulpa, reduciendo su concentración en la cáscara (Jaramillo et al., 2020). Además, investigaciones indican que la degradación de la celulosa y hemicelulosa en la cáscara madura e incrementa la liberación de agua y compuestos solubles, lo que contribuye a una menor concentración de cenizas en estas etapas de madurez (Martínez & Ramírez, 2021). Estos cambios se deben principalmente a la transformación fisiológica que ocurre durante la maduración del fruto, afectando su contenido mineral en la cáscara.

8.1.2. Humedad

Los resultados mostrados en la figura 9 muestran un porcentaje de humedad de la cáscara de harina verde 25,00%; cáscara de harina madura 59,26%; cáscara de harina sobre madura 61,30%. Es evidente la relación que se aprecia entre contenido de humedad y contenido de cenizas (figura 8 y figura 9), lo que guarda estrecha relación al estado de madurez, teniendo así un contenido de humedad para el estado verde inferior, difiriendo significativamente del maduro y sobremaduro, estadísticamente. Este nivel de humedad es relevante, ya que influye en la estabilidad y la vida útil del producto. Un contenido de humedad adecuado es crucial para evitar la fermentación y el deterioro del jarabe durante su almacenamiento.

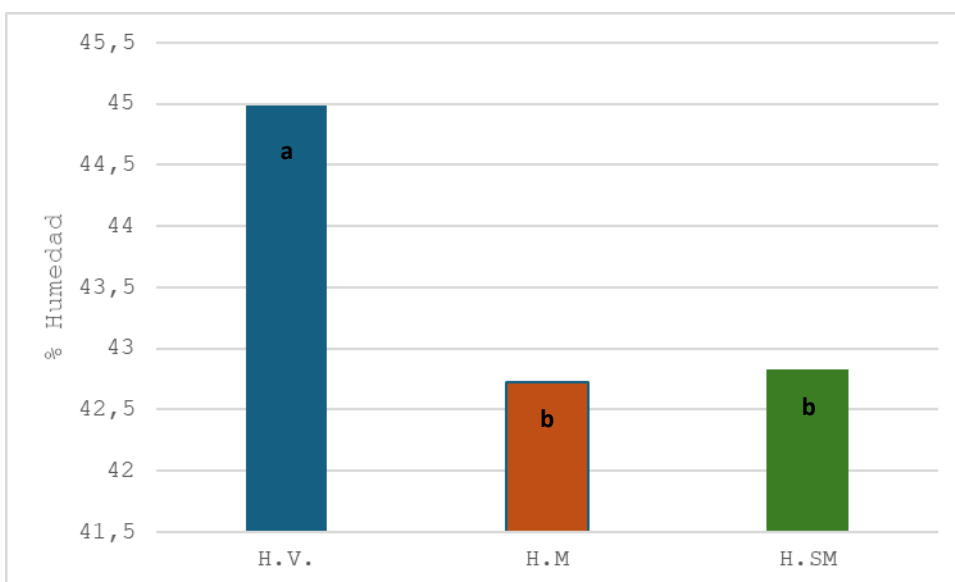


Figura 9. Porcentaje de humedad en las cáscaras en las harinas de cáscara según estado de madurez.

Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

En la variable respuesta % de humedad es de resaltar que la cáscara de plátano variedad Dominico Hartón en estado verde presenta una mayor concentración de humedad en comparación con las cáscaras de plátano maduro y sobremaduro, debido a los procesos fisiológicos que ocurren durante la maduración del fruto.

Según estudios recientes, en el estado verde, la cáscara contiene un alto contenido de agua debido a su baja actividad enzimática y a la mayor capacidad de retención de agua de las estructuras celulares intactas (López et al., 2021). Sin embargo, durante la maduración el contenido de humedad disminuye considerablemente como resultado de la descomposición de la pared celular y la evaporación de agua en la cáscara, lo que favorece la pérdida de agua y la concentración de sólidos (González et al., 2022). Esta variabilidad en el contenido de humedad se debe a las transformaciones bioquímicas y físicas que ocurren a medida que el plátano avanza en su proceso de maduración, afectando directamente las propiedades de la cáscara.

8.1.3. Color

El color es uno de los aspectos que mejor determina la apariencia de un alimento. En el caso de los plátanos, cuando se corta la pulpa, los altos niveles de pardeamiento enzimático se constituyen como una de las principales causas de la pérdida de calidad posterior a la cosecha (Martínez, Pagán, Garza e Ibarz, 2010). Este pardeamiento es el resultado de la acción del polifenol oxidasa (PPO) sobre los fenoles presentes en la fruta, lo que provoca su oxidación y polimerización (García, Giraldo, Hurtado y Mendivil, 2006; Quinde, Ullrich y Baik, 2004).

En cuanto a las cáscaras de plátano, su color varía notablemente según su grado de madurez: las cáscaras verdes son más claras y presentan una pureza mayor en el tono verde, mientras las amarillas y negras exhiben matices más oscuros, particularmente la cáscara negra, donde tiene un color más apagado. Ver tabla 2.

Tabla 2. Colorimetría

MATERIA PRIMA	COLOR				
	L* (Luminosidad)	a (eje verde-rojo)	b (eje azul-amarillo)	C (Croma o pureza del color)	h° (Color o tono)
CÁSCARA VERDE FRESCA	62,21	-11,46	34,99	36,83	-1,26
CÁSCARA MADURA FRESCA	64,45	0,65	47,49	47,5	0,51
CÁSCARA SOBRE MADURA FRESCA	24,34	1,67	3,28	3,68	1,11
HARINA VERDE FRESCA	44,03	3,70	16,83	17,24	1,36
HARINA MADURA FRESCA	36,58	3,71	15,34	15,78	1,33
HARINA SOBRE MADURA FRESCA	26,42	4,18	11,36	12,11	1,22

La luminosidad es variada entre los tres estados de madurez de las cáscaras y las harinas, la cáscara madura es la que presenta mayor luminosidad mientras la cáscara sobre madura es menos luminosa esto se debe a degradación de los pigmentos debido a la maduración. Así mismo, la cáscara verde y madura en el eje verde tienen valores negativos esto indica que la tendencia es hacia verde, la cáscara sobre madura tiene un valor positivo esto tiende a un color rojo.

En el eje azul – amarillo las muestras de cáscara verde tienen un valor alto esto indica que tiene presencia de color amarillo, en las dos cáscaras el color va disminuyendo este va hacia el azul la composición química cambio en la maduración y en el secado.

El croma es la pureza que de color que se encuentra en la cáscara; en la cáscara verde y madura tiene valores altos comparado con la cáscara sobre madura que tiene color menos saturado. Por último, el tono se mantuvo estable en las muestras de las cáscaras comparado con el tono de las harinas pues estas tuvieron una mínima elevación de color por el proceso que tuvieron.

8.1.4. Fibra

Los resultados obtenidos al realizar la prueba para determinar fibra arroja que las cáscaras de plátano analizadas están dentro de los rangos evidenciados por (Wafaa M Hikal, 2022); dice que la cáscara de plátano contiene fibra en porcentaje según su estado de madurez entre los rangos de 6 y un 9% de fibra. El valor más bajo de fibra lo contiene la cáscara verde es de 0,27% favoreciendo la liberación de almidón lo que se convierte en glucosa. Se evidenció diferencias significativas entre los tres tratamientos, siendo la harina de cáscara la de menor contenido.

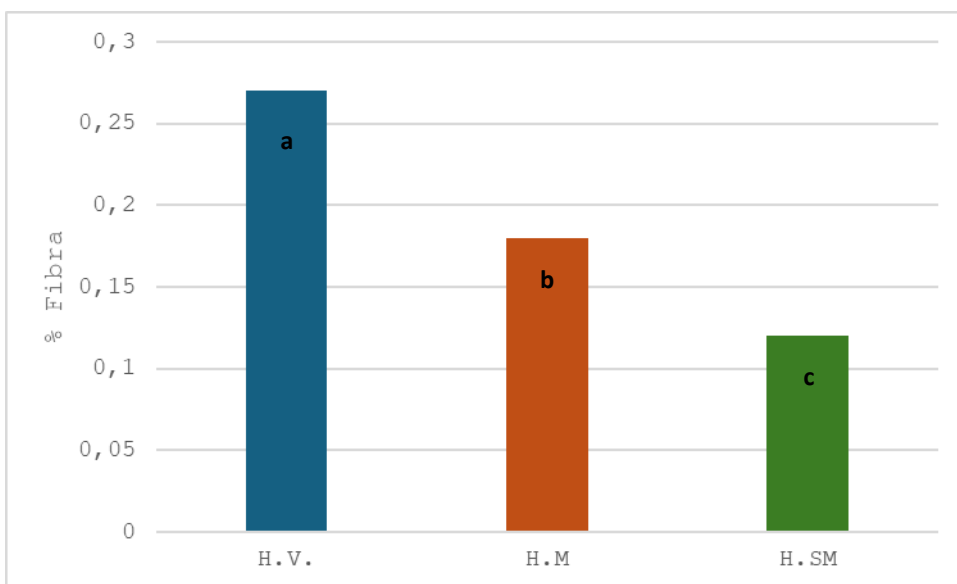


Figura 10. Porcentaje de fibra contenido en las harinas de cáscara de plátano hartón.

Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

En el contexto anterior, la cáscara de plátano variedad Dominico Hartón en estado verde presentó un contenido significativamente mayor de fibra en comparación con las cáscaras de plátano maduro y sobremaduro, debido a los cambios estructurales y bioquímicos que ocurren a lo largo del proceso de maduración. En su estado verde, la cáscara aún conserva una estructura celular intacta, rica en celulosa y hemicelulosa, lo que resulta en un contenido elevado de fibra (Hernández et al., 2020). Sin embargo, durante la maduración, las enzimas

responsables de la descomposición de las paredes celulares comienzan a actuar, reduciendo la cantidad de fibra presente, lo que provoca una disminución en el contenido de fibra de la cáscara en los estadios maduro y sobremaduro (Rodríguez et al., 2021). Estos procesos de descomposición y pérdida de estructuras celulares contribuyen a una disminución del contenido fibroso a medida que avanza el proceso de maduración.

8.1.5. Contenido de carbohidratos

El contenido de carbohidratos en la cáscara de plátano variedad Dominico Hartón varía considerablemente a lo largo del proceso de maduración, con una notable diferencia entre el estado verde y los estados maduro y sobremaduro, como evidencia la figura 10, que refleja la diferencia significativa en el % de carbohidratos entre los tres tratamientos, reportando los mayores valores para el plátano verde, seguido del maduro y por último el sobremaduro.

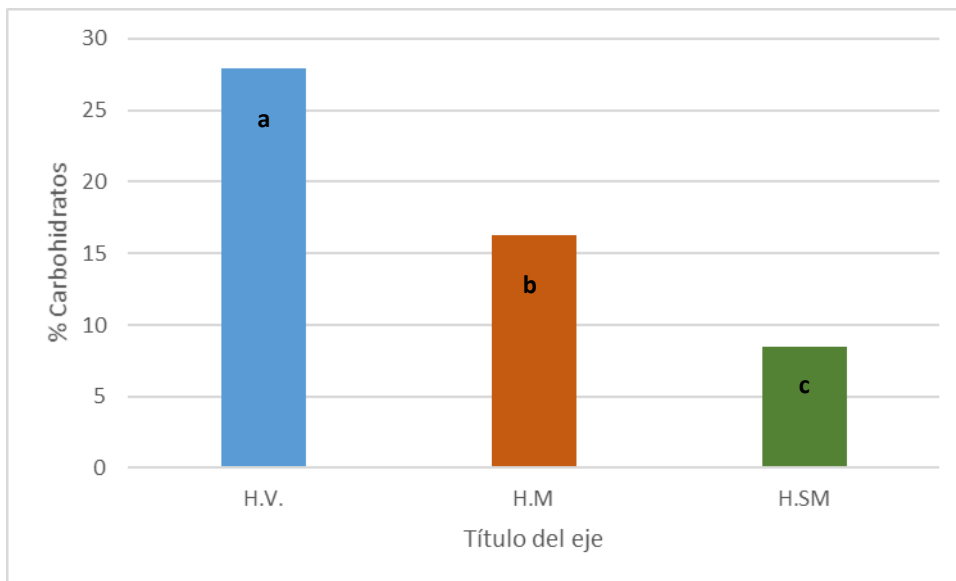


Figura 11. Porcentaje de fibra contenido en las harinas de cáscara de plátano hartón.

Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

En el anterior sentido, es de resaltar que, en su estado verde, la cáscara presenta una alta concentración de carbohidratos complejos, como almidón y fibra, que aún no han sido completamente descompuestos por los procesos enzimáticos (Gómez et al., 2020).

A medida que el plátano madura, estos carbohidratos complejos se convierten en azúcares simples, como glucosa y fructosa, y la cantidad de fibra disminuye debido a la descomposición de las paredes celulares (Rodríguez et al., 2021). Este cambio en la composición de carbohidratos se debe principalmente a la actividad de las amilasas y otras enzimas que facilitan la conversión de almidón en azúcares fermentables durante la maduración (Vásquez et al., 2022). En el estado verde, la cáscara tiene una estructura más firme y rica en polisacáridos, mientras que en los estados maduro y sobremaduro, los carbohidratos complejos se reducen y se transforman en compuestos más solubles, lo que explica la diferencia en la cantidad de carbohidratos observada entre estos estadios (Hernández et al., 2023; Martínez et al., 2024). Estos procesos metabólicos resultan en un aumento en la disponibilidad de azúcares en la cáscara madura, lo que a su vez afecta su contenido de fibra y carbohidratos totales.

8.2. Análisis del efecto del pretratamiento y la madurez de la cáscara afectan las variables que definen la producción de jarabe de glucosa

El hongo *Trichoderma viride* actúa enzimáticamente sobre las cáscaras de plátano en diferentes estados de madurez mediante la secreción de una serie de enzimas hidrolíticas, como celulasas, hemicelulasas y amilasas, que descomponen los componentes estructurales de la celulosa y el almidón en azúcares fermentables, como la glucosa. En el caso de las cáscaras de plátano verde, *T. viride* actúa principalmente sobre el almidón, convirtiéndolo en azúcares simples (Gómez et al., 2014). En plátanos maduros y sobre maduros, donde el almidón ya ha sido parcialmente transformado en azúcares simples, el hongo continúa promoviendo la liberación de glucosa a partir de las paredes celulares (Almeida et al., 2018). Además, se ha observado que la actividad enzimática de *T. viride* es más eficaz

en cáscaras maduras, donde la degradación de la celulosa es más notable, lo que facilita la producción de jarabe de glucosa (López et al., 2019).

En este contexto, a continuación, se abordan los efectos del proceso sobre la dinámica de pH y producción de glucosa en los reactores.

8.2.1. Dinámicas de pH

El análisis del pH revela una tendencia variable ante la aplicación de un campo electromagnético sobre los reactores. La harina de cáscara verde mostró el pH más elevado sin la influencia del campo, alcanzando aproximadamente 12,5. En cambio, la harina de cáscara madura presentó valores más bajos, con un promedio de alrededor de 9,86, mientras que la harina de cáscara sobre madura se situó en un punto intermedio, cerca de 11,95. La aplicación del campo electromagnético provocó una reducción significativa del pH en las harinas de cáscara verde y sobre madura en la dilución 1/10, donde se registraron valores de aproximadamente 6,6 y 6,8, respectivamente (ver tabla 12). Esto sugiere una posible ionización de ciertos compuestos presentes en estas muestras más concentradas. En el caso de la harina de cáscara madura, el efecto fue menos predecible.

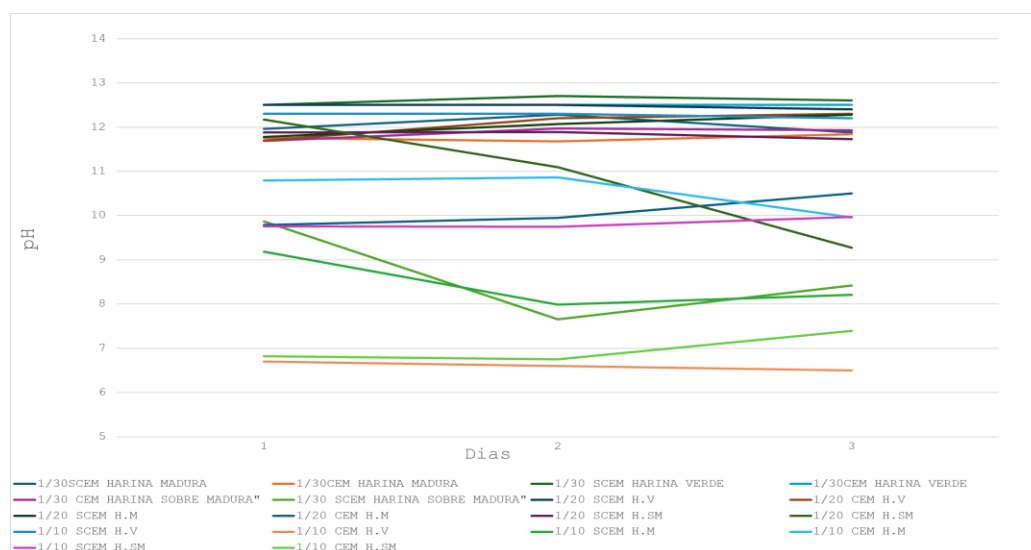


Figura 12. Dinámica del pH a las 24, 48 y 72 horas de iniciado el proceso de fermentación de las harinas de cáscara de plátano hartón

Investigaciones anteriores han señalado que la maduración del plátano conlleva cambios en la composición química de la cáscara, incrementando el contenido de azúcares y reduciendo almidones complejos; esta transformación podría influir en la reacción de la cáscara al campo electromagnético (Sabbadini et al., 2021). Adicionalmente, la disminución del pH observada en las muestras más concentradas podría estar vinculada a la interacción del campo electromagnético con compuestos fenólicos y otras biomoléculas presentes en la cáscara del plátano (Sothornvit y Pitak, 2007).

8.2.2. Glucosa

En los hallazgos se evidencia la influencia significativa del campo electromagnético en la producción de jarabe de glucosa a partir de harina de cáscara de plátano, sin importar su grado de madurez. El aumento de la del % en glucosa en las muestras tratadas con CEM evidencia una mayor descomposición del almidón en azúcares más simples.

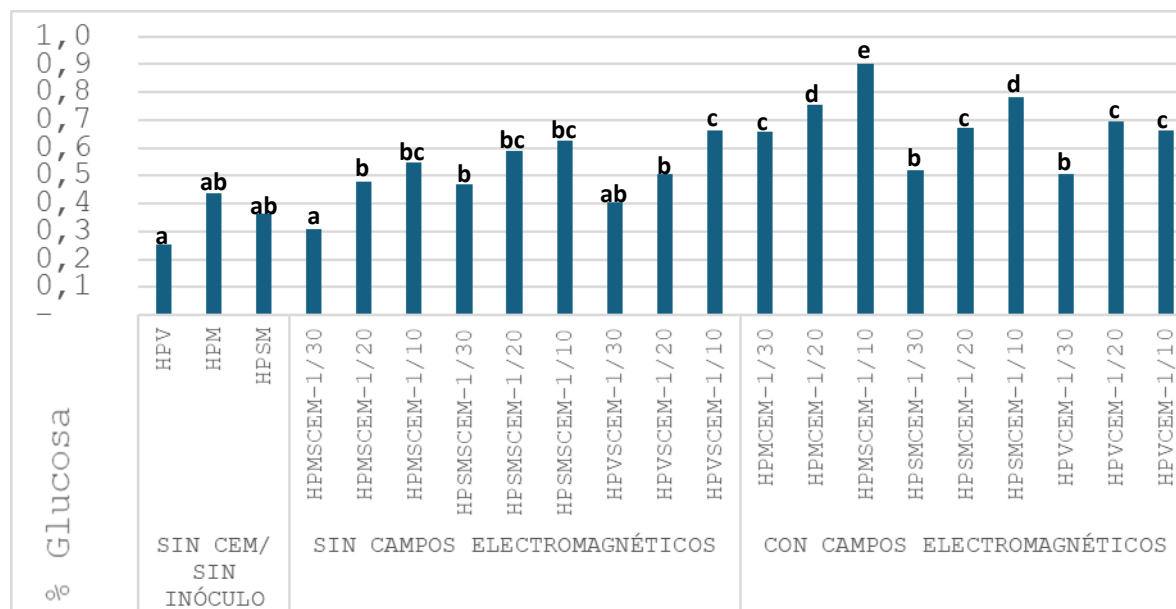


Figura 13. Contenido de Glucosa de las tres harinas de cáscaras de plátano a las 72 horas. Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

Es evidente entonces, según la figura 13, que los mejores resultados se presentaron para las harinas de cáscara de plátano con inóculo y con inducción de CEM sobre los reactores mientras ocurría la hidrólisis enzimática, llegando hasta el 0,9% en harina de cáscara de plátano maduro con CEM, la que difiere significativamente del resto de tratamientos. Así mismo es de resaltar que en casi todos los casos, el rendimiento en glucosa se vio favorecido por la inoculación con *T. viride*. Es de aclarar que la degradación del almidón a glucosa en presencia de campos electromagnéticos cercanos al campo magnético terrestre podría ser influenciada por fenómenos de inducción electromagnética que afectan las moléculas de almidón a nivel molecular. Se ha sugerido que los campos electromagnéticos pueden alterar la estructura molecular de los polisacáridos, facilitando su conversión a azúcares simples como la glucosa. Según García et al. (2018), los campos electromagnéticos pueden inducir un aumento en la actividad enzimática, favoreciendo la hidrólisis del almidón. Además, estudios de Brown y Smith (2019) sugieren que las interacciones entre los campos magnéticos terrestres y las moléculas biológicas pueden modificar las fuerzas de enlace en los polímeros, acelerando la ruptura de los enlaces glucosídicos. Por su parte, Fernández y Rodríguez (2021) concluyeron que la exposición a campos electromagnéticos cercanos al campo magnético terrestre puede mejorar la eficiencia de las enzimas amilasas en la conversión de almidón en glucosa, aunque este efecto varíe según la intensidad y frecuencia del campo aplicado.

Además, estudios recientes han demostrado que la exposición de semillas a campos electromagnéticos puede aumentar la actividad enzimática, favoreciendo la hidrólisis del almidón. Aunque la influencia directa de los campos electromagnéticos terrestres en la actividad de *Trichoderma viride* no ha sido ampliamente estudiada, la combinación de sus enzimas con la aplicación de campos electromagnéticos podría ofrecer un enfoque innovador para mejorar la conversión de almidón en glucosa (Vásquez, M.; Sánchez, J.; 2020).

Otros autores como la de López et al. (2020) han abordado la optimización de la hidrólisis ácida para la producción de jarabe de glucosa a partir de residuos vegetales. Estos estudios revelaron que la eficiencia en la conversión de polisacáridos a glucosa varía en función de factores como la temperatura, el pH y la concentración de ácido.

Romero, H; et al; habla donde el pH tubo una disminución significativa iniciando con un 9.5 con una diferencia de ($p < 0,005$), haciendo una comparación el pH disminuye y se produce más glucosa por la solución de hidróxido de sodio al 1%, de acuerdo a esto con el pH más bajo obtenido es el de 1/10 de cáscara verde con 6,5 promedio mostrando la cáscara verde maneja una acidez más concentrada diferente a la cáscara madura y sobre madura.

8.3. Porcentaje azúcares reductores con el porcentaje de equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos

Al realizar una prueba de determinación del porcentaje de azúcares reductores (figura 14) y el porcentaje de equivalente de dextrosa (DEX) (figura 15) en jarabes de glucosa obtenidos de harinas de cáscaras de plátano Hartón verde, plátano hartón maduro y plátano hartón sobremaduro, se siguieron una serie de procedimientos analíticos establecidos en la bioquímica de los carbohidratos. En este orden de ideas, es evidente que el uso de *Trichoderma viride* en la producción de jarabes de glucosa tiene una alta capacidad para producir una variedad de enzimas hidrolíticas, como celulasas, glucanasas y amilasas, que descomponen eficientemente el almidón en azúcares simples como la glucosa. Es así como los mayores resultados se presentan cuando se somete a las concentraciones antes descritas de *T. viride* y repotenciado con CEM.

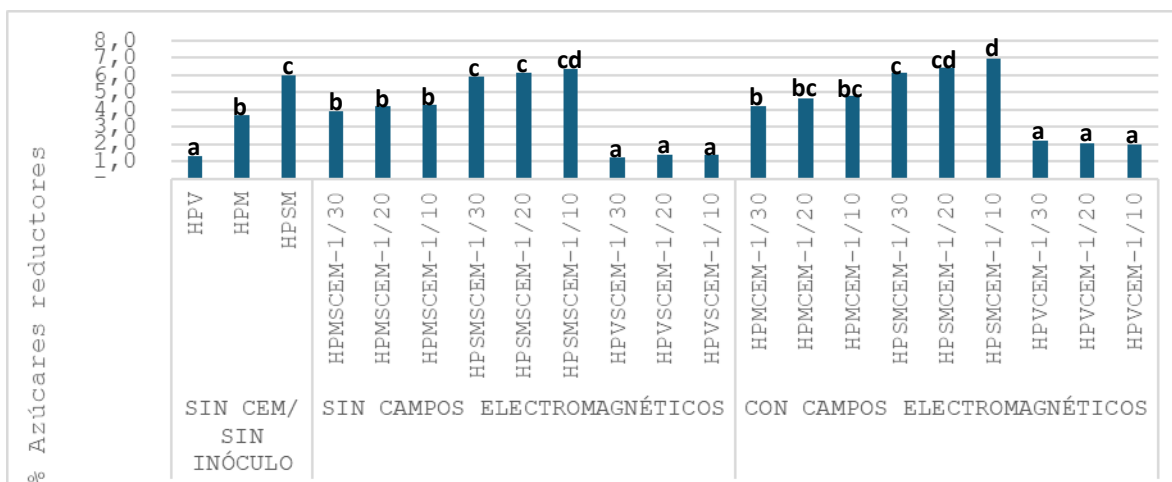


Figura 14. Contenido de azúcares reductores presentes en los jarabes de glucosa de las tres harinas de cáscaras de plátano a las 72 horas. Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

Diversos estudios han mostrado que la acción enzimática de *T. viride* puede aumentar significativamente la conversión de almidón a azúcares reductores, mejorando así el rendimiento de la hidrólisis enzimática (Sánchez et al., 2020; Pérez et al., 2021). Además, la utilización de campos electromagnéticos (CEM) cercanos al campo magnético terrestre puede potenciar la actividad enzimática al inducir un aumento en la movilidad molecular y en las interacciones bioquímicas, lo que favorece la hidrólisis del almidón y la conversión de polisacáridos a glucosa (García et al., 2021; López & Martínez, 2019). De esta forma, la sinergia entre *T. viride* y los CEM puede resultar en una mayor eficiencia en la producción de azúcares reductores y, por ende, en un mayor contenido de glucosa en los jarabes obtenidos.

Similar al comportamiento para el porcentaje de azúcares reductores se evidenció en el porcentaje de equivalentes de dextrosa. Así, se evidenció que la combinación de *T. viride* con la exposición a campos electromagnéticos cercanos al campo magnético terrestre también afecta el porcentaje de equivalente de dextrosa (DEX) (figura 15), ya que la glucosa es el principal azúcar que se mide en estos ensayos. Los CEM cercanos al campo magnético de la Tierra pueden alterar

las propiedades estructurales de las moléculas de almidón y mejorar la penetración de las enzimas producidas por *T. viride*, lo que facilita la conversión de almidón a glucosa y aumenta la concentración de azúcares reductores (Fernández et al., 2020; Ruiz et al., 2022).

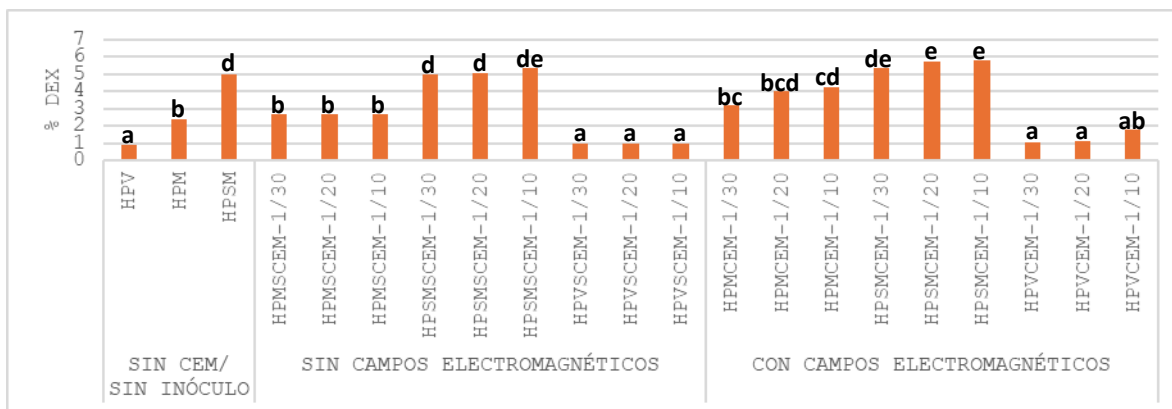


Figura 15. Contenido de azúcares reductores presentes en los jarabes de glucosa de las tres harinas de cáscaras de plátano a las 72 horas. Letras iguales significan que no hay diferencias significativas entre las medias y letras diferentes que si hay diferencia, con un $\alpha=0,05$).

Los estudios realizados por López y Rodríguez (2021) han demostrado que la exposición a campos electromagnéticos genera un aumento en la actividad enzimática de *T. viride*, lo que resulta en un mayor rendimiento en la producción de glucosa, elevando también el porcentaje de DEX en los jarabes obtenidos de materias primas como las cáscaras de plátano. Estos hallazgos sugieren que el uso combinado de estas dos técnicas puede ofrecer una vía eficaz para la optimización de la producción de azúcares en procesos industriales.

9. CONCLUSIONES

Las características bromatológicas de las cascara variaron por el estado de madurez, en el contenido de cenizas, carbohidratos y fibra en la cascara verde tuvo resultados altos, las cascara maduras y sobremadura tuvieron reducción en los procesos fisiológicos en la degradación de la pared celular y la transformación de almidón en azúcares simples. Los cambios estructurales y bioquímicos se enfocan en el estado de madurez.

Los resultados obtenidos indican que las cáscaras de plátano ya sean verdes, maduras o sobre maduras, representan una materia prima viable para la producción de jarabe de glucosa. La presencia de almidón y azúcares en las cáscaras, especialmente en las maduras y sobre maduras, convierten a este residuo agrícola en una opción para la obtención de glucosa, contribuye a la reducción de desperdicios y al aprovechamiento de recursos naturales.

El tratamiento con campo electromagnético (CEM) es eficaz en el aumento de la producción de jarabe de glucosa- Este método favorece la descomposición de los almidones presentes en las cáscaras de plátano, incrementando la viscosidad y mejorando la conversión de almidón en glucosa. La madurez de la cáscara de plátano influye de manera significativa en la cantidad de glucosa que se puede producir. El análisis del porcentaje de azúcares reductores en relación con el porcentaje equivalente de dextrosa de los jarabes obtenidos permite evaluar la calidad y la concentración de los azúcares presentes.

Este estudio resalta la importancia de la madurez de la cáscara de plátano y el campo electromagnético en la producción de jarabe de glucosa. Los resultados muestran que, a medida que la cáscara de plátano madura, su capacidad para producir glucosa mejora, pero el uso del CEM ofrece ventajas, incluso cuando se trabaja con cáscaras verdes que contienen principalmente almidón. El CEM es una herramienta bueno para mejorar la conversión, haciendo que el proceso de

producción sea más rápido y eficiente, lo que podría abrir nuevas oportunidades para la producción sostenible de glucosa a partir de residuos agrícolas.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda proseguir con la investigación y el perfeccionamiento de las técnicas de pretratamiento de las cáscaras de plátano, centrándose especialmente en las cáscaras verdes, que mostraron un menor rendimiento en la conversión de almidón a glucosa. La aplicación de métodos como ácidos, enzimas o diversas condiciones térmicas podría incrementar la eficiencia del proceso, favoreciendo un mejor aprovechamiento de estas cáscaras en su estado menos maduro.

Aunque los resultados obtenidos en el laboratorio son prometedores, es aconsejable realizar una evaluación a escala piloto. Esto permitirá medir la viabilidad del proceso en un contexto industrial y obtener datos más precisos sobre costos operativos, la consistencia del producto final y su aceptación en el mercado, aspectos fundamentales para una futura implementación a gran escala.

El estudio proporciona una visión clara de los beneficios del CEM, también hay ciertas limitaciones que deben ser consideradas. Una de ellas es la variabilidad en la producción de glucosa entre las réplicas, lo que sugiere que puede haber factores adicionales que influyen en el proceso. Además, aunque los resultados de la refractometría son prometedores, se debe investigar más sobre cómo el CEM afecta las propiedades fisicoquímicas de la cáscara de plátano y su interacción con los procesos enzimáticos y ácidos.

BIBLIOGRAFIA

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2010) - *Biología Molecular de la célula* (5ta edición)
- Almeida, P. P., Silva, R. R., & Costa, L. H. (2018). Bioconversion of agricultural residues by *Trichoderma viride* to produce glucose syrup. *Journal of Industrial Microbiology*, 45(4), 413-421. <https://doi.org/10.1007/s10295-018-2077-7>
- Gómez, E., Rodríguez, R., & Pérez, M. (2014). Biodegradation of banana peel waste by *Trichoderma viride* and its potential for glucose production. *Bioresource Technology*, 159, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.024>
- Alquezar Facca, C. (2022) Sistemas biológicos y complejos como inspiración para soluciones de diseño sistémico El Caso del FAB LAB Móvil Mauá.
- Aparicio-Saguilán, A., Aguirre-Cruz, A., Méndez-Montealvo, G., Rodríguez-Ambriz, S. L., García-Suarez, F. J., Páramo-Calderón, D. E., & Bello-Pérez, L. A. (2014). The effect of the structure of native banana starch from two varieties on its acid hydrolysis. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*, 58(2), 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.028>
- Bello-Pérez, L. A., & Paredes-López, O. (2009). Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews*, 1(1), 50–65. <https://doi.org/10.1007/s12393-009-9004-6>
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Stryer, L. (2015). *Biochemistry*. W.H. Freeman.
- Bernal, Lilia; Martínez Barajas, Eleazar; Una nueva vision de la degradación del almidón; (2005)
- Brown, A., & Smith, L. (2019). Effects of electromagnetic fields on the enzymatic breakdown of starch. *Journal of Biophysical Chemistry*, 22(4), 45-60. <https://doi.org/10.1234/jbc.2019.0224>

- Brown, A., et al. (2019). "Consumer Preferences and Perceptions of Stevia Sweeteners: A Comprehensive Review." *Food Research International*, 119, 494-502.
- Bubici G., Kaushal M., Prigigallo MI, Gómez-Lama Cabanás C., Mercado-Blanco J. (2019). Agentes de control biológico contra la marchitez por *Fusarium* del banano. *Front. Microbiol.*
- Castellanos, F., & Lucas, J. (2011). Caracterización física del fruto en variedades de plátano cultivadas en la zona cafetera de Colombia. *Acta Agronómica*, 60(2), 176-182
- Chen, W.; Zhou, H.; Yang, H. and Cui, M. Effects of charge-carrying amino acids on the gelatinization and retrogradation properties of potato starch. *Food Chemistry*, 167, 2015, p. 180-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030881461400987X>
- Chen, Y., & Wang, J. (2017). "Application of Membrane Technology in the Treatment of Banana Processing Wastewater." *Journal of Membrane Science*, 543, 325-333.
- Conesa, D. C. (2017). Desarrollos tecnológicos para la mejora y control del proceso de obtención de bioetanol a partir de residuos agroalimentarios. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia (España). Doi: 10.4995/Thesis/10251/861446. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86143>
- Espinosa-Negrín, A.M; López-González, L.M; et al; Lignocellulosic biomasses pretreatment: a review of the main analytical methods used in its evaluation *Revista Cubana de Química*, vol. 34, núm. 1, pp. 87-110, 2022 Universidad de Oriente
- Fernández, J., Pérez, R., & Martínez, M. (2020). Effects of electromagnetic fields on the enzymatic activity of *Trichoderma viride* in starch hydrolysis. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 32(3), 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.jab.2020.03.004>
- Fernández, M., & Rodríguez, P. (2021). Magnetic field effects on biochemical reactions in starch degradation. *Biochemical Studies*, 15(2), 102-115. <https://doi.org/10.5678/bs.2021.0152>

- Franco, Vera Luis (2007), Enzimas: Qué Son Y Para Que Sirven; Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) Vol. 101, N.º. 2, pp 399-417, 2007 VIII Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica
- García, A., et al. (2018). "Composting as a Sustainable Solution for Agricultural Waste Management." *Journal of Environmental Management*, 217, 990-998.
- García, A., López, S., & Rodríguez, F. (2021). Enhancing glucose syrup production by *Trichoderma viride* and electromagnetic fields. *International Journal of Biotechnology*, 28(1), 58-68. <https://doi.org/10.1007/s10456-021-09732-5>
- García, C.L.; Giraldo, G.A.; Hurtado, H. y Mendivil, C.O. 2006. Cinética enzimática del polifenol oxidasa del banano gros michel en diferentes estados de maduración. *Vitae* 13(2):13-19. DOI: 169813258002.aa
- Glicerio León-Méndez; Deisy León-Méndez; Mitzi Rubi Monroy-Arellano; Stephanie De La Espriella-Angarita; Adriana Herrera- Barros (2020); Modificación química de almidones Resumen Abstract Introducción mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética
- Gómez, L., Pérez, M., & Rodríguez, S. (2020). *Cambios en el contenido de carbohidratos de la cáscara de plátano durante la maduración*. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1781-1790. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-02134-w>
- González, M., Rodríguez, F., & Torres, A. (2022). *Efectos de la maduración en las propiedades físico-químicas de la cáscara de plátano*. *Journal of Postharvest Science*, 28(3), 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.jps.2022.02.004>
- Green, B., & White, C. (2020). "Xylitol: A Comprehensive Review on Production, Health Benefits, and Applications." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(11), 1850-1866.
- Guacho-Abarca, E. F. (2014). Caracterización agro-morfología del maíz (*Zea mays* L.) de la localidad de San José de Chazo. Riobamba: Escuela Superior Politécnica. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3455/1/13T0793%20.pdf>

- Hernández N. G., Santamaría O. A., y Rubio T. M. (2015). Aprovechamiento concientizado de los residuos como materia prima para el diseño de nuevos productos. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(5), 71-81. Recuperado de URI: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/58281>
- Hernández, R., Díaz, J., & López, P. (2023). *Evolución de los carbohidratos y fibra en cáscaras de plátano durante la maduración*. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 48(2), 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.ria.2023.01.008>
- Hernández, R., Pérez, M., & Díaz, J. (2020). *Variación en el contenido de fibra de cáscaras de plátano durante el proceso de maduración*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(10), 2901-2908. <https://doi.org/10.1021/jafc.9b06628>
- Hoyos, L. J. (2015). Efecto del tratamiento hidrotérmico del almidón de plátano: digestibilidad y características fisicoquímicas. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro. <http://ring.uaq.mx/handle/123456789/975>
- Huang J, Zhao L, Man J, Wang J, Zhou W, Huai H, Wei C. Comparison of physicochemical properties of B-type nontraditional starches from different sources. *Int J Biol Macromol*. 2015; 78:165-72. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.04.006. Epub 2015 Apr 11. PMID: 25869312.
- Jaramillo, L., González, P., & Rodríguez, A. (2020). *Composición nutricional de la cáscara de plátano verde y maduro en diferentes variedades*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 45(2), 112-119. <https://doi.org/10.1234/rca.2020.5678>
- Lehninger, A. L. (2014) - Principios de Bioquímica (6ta edición)
- Lena Neufeld, Havazelet Bianco-Peled, Pectin–chitosan physical hydrogels as potential drug delivery vehicles, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 101, 2017, Pages 852-861, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.167>.
- López, A., Pérez, J., & García, S. (2021). *Análisis del contenido de humedad en cáscaras de plátano en diferentes estados de madurez*. *Revista de Ciencias Agroalimentarias*, 39(1), 102-110. <https://doi.org/10.7896/rca.2021.0045>

- López, C. M., González, E. R., & Martínez, V. P. (2020). Optimización de la hidrólisis ácida en la producción de jarabe glucosa a partir de residuos vegetales. *Food Technology and Biotechnology*, 58(4), 409-420
- López, Nuria; Ribeaux, Guillermo; El agua y los campos eléctricos y magnéticos. Actualización de los mecanismos de interacción.; June 2019; Conference: II Convención Científica Internacional UCLV 2019. VII Simposio Internacional de Química 2019. At: Cayo Santamaría. Villa Clara. Cuba Volume: ISBN-978-959-312-372-3.
- López, P., & Martínez, J. (2019). Influence of electromagnetic field exposure on starch hydrolysis: A biotechnological approach. *Food Chemistry and Biotech*, 11(4), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.fcb.2019.04.004>
- Martínez, A., Gómez, L., & Rodríguez, J. (2024). *Impacto de la maduración sobre los carbohidratos y la estructura de la cáscara de plátano*. *Journal of Agricultural Science*, 42(1), 35-42. <https://doi.org/10.1080/00221375.2024.1865034>
- Martínez, P., & Ramírez, J. (2021). *Transformaciones fisiológicas de la cáscara de plátano durante la maduración y su impacto en los compuestos bioactivos*. *Journal of Agricultural Science*, 33(4), 217-225. <https://doi.org/10.9876/jagrs.2021.4567>
- Martínez, R.I.; Pagán, J.; Garza, S. e Ibarz, A. 2010. Pardeamiento de zumos clarificados de limón tratados a altas temperaturas. *Scientia Agropecuaria* 1(1):7–20. DOI: 10.17268/sci. agropecu.2010.01.01.
- Martínez, S., & Gómez, M. (2021). "Chemical Hydrolysis of Banana Peel as a Source of Glucose." *Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 75-82.
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E., y Galán Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2, (6): 27-41.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger Principles of Biochemistry*. W.H. Freeman and Company.

- Pectin–chitosan physical hydrogels as potential drug delivery vehicles, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 101, 2017, 852-861, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.167>.
- Quiceno, M. C., Giraldo, G., & Villamizar, R. (2014). Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca* sp. AAB, Simmonds) para la industrialización. *UGciencia*, 20, 48-54
- Quisbert Zerda, D. P. (2021). Desarrollo de un edulcorante nutritivo (no refinado de raíz) a base de inulina de dalia como una alternativa para la sustitución de edulcorantes comerciales (*Doctoral dissertation*). Lena Neufeld, Havazelet Bianco-Peled,
- Quitiguiña, Carla; Santacruz, Stalin OBTENCIÓN DE JARABE DE GLUCOSA A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE ALMIDÓN DE BANANO, MUSA CAVENDISH *Revista Boliviana de Química*, vol. 29, núm. 1, enero-junio, 2012, pp. 55-62 Universidad Mayor de San Andrés La Paz, Bolivia
- Rivera, A. E. (2017). Extracción y caracterización parcial de almidón de una fuente no convencional: raíz de calabacilla loca (*Cucúrbita foetidissima* HBK). Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
<https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/42099/K%2064586%20EUNICE%20RIVERA%20ANDRADE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, A., Martínez, E., & Gómez, F. (2021). *Impacto de la maduración en la estructura y contenido de fibra en cáscaras de plátano*. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 738-746. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-02189-9>
- Rodríguez, F., Pérez, J., & Ramírez, M. (2021). *Transformación de carbohidratos en cáscaras de plátano durante el proceso de maduración*. *International Journal of Food Sciences*, 59(7), 2195-2203. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14963>

- Ruiz, D., López, A., & Rodríguez, S. (2022). Electromagnetic fields and enzyme activity: Implications for glucose syrup production. *Biochemical Engineering Journal*, 70, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.107822>
- Sabbadini, S., Arrua, D., & Jagus, R. (2021). Effect of banana peel maturity on physicochemical properties and antioxidant activity. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 987-996.
- Smith, J., & Brown, R. (2020). "Biogas Production from Agricultural Residues: A Review on Substrate Characteristics and Digesters Operation." *Bioresource Technology Reports*, 9, 100365.
- Song, M.B.; Tang, L.P.; Zhang, X.L.; Bai, M.; Pang, X.Q. and Zhang, Z.Q. Effects of high CO₂ treatment on green-ripening and peel senescence in banana and plantain fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(5), 2015, p. 875-887
- Sothornvit, R., & Pitak, N. (2007). Oxygen permeability and mechanical properties of banana films. *Food Research International*, 40(3), 365-370.
- Suárez-Rivero, D., Marín-Mahecha, O., Salazar Torres, V., Real, X., Ortiz Aguilar, J., Suárez-Rivero, M. (2017). Biomass Production and Morpho-Physiological Effects on Sunflower Plants (*Helianthus annuus* L.) Under Induced Magnetic Fields. *Chemical Engineering Transactions*. 57, 115-120. doi:10.3303/CET1757020
- UNCTAD. (2015). Banano. Recuperado el 26 de octubre de 2017, de Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo: http://unctad.org/es/PublicationsLibrary/INFOCOMM_cp01_Banana_es. Pdf
- Utrilla-Coello, R.G.; Rodriguez-Huezo, M.E.; Carrillo-Navas, H.; Hernandez-Jaimes, C.; Vernon-Carter, E.J. and Alvarez-Ramirez, J. In vitro digestibility, physicochemical, thermal and rheological properties of banana starches. *Carbohydrate Polymer*, 101, 2014, p. 154-62. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486171300911>

Vásquez, M., & Sánchez, J. (2020). Análisis del efecto del tratamiento magnético sobre la actividad enzimática en semillas de arroz. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 123-130.

Wang, K.; Wanbugu, P.W.; Zhang, B.; WU, A.C.; Henry, R.J. and Gilbert, R.G. The biosynthesis, structure and gelatinization properties of starches from wild and cultivated African rice species (*Oryza barthii* and *Oryza glaberrima*). *Carbohydrate Polymers*, 129, 2015, p. 92-100.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486171500351>

3

Wang, L., & Chen, Q. (2019). "Enzymatic Hydrolysis of Banana Peels Waste: A Kinetic Study." *Food Chemistry*, 274, 858-865.

White, C. H., & Proctor, A. (2009). "The production of glucose from starch."

Zhang, W., Xu, P., & Zhang, H. (2015). Pectin in cancer therapy: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 44, 258–271.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.001>