

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CALKINÍ

**“SÍNTESIS DE ÁCIDO LÁCTICO A PARTIR DE CÁSCARAS DE PLÁTANO
(MUSA PARADISIACA), PARA SU POSIBLE CONVERSIÓN EN PLA Y SU
APLICACIÓN COMO APÓSITOS”**

TESIS PARA TITULACIÓN INTEGRAL

INGENIERÍA BIOQUÍMICA

**EGRESADA:
JENNIFER JANETH BALAM MONTERO**

**DIRECTOR
DR . MARIO ADRIAN DE ATOCHA DZUL CERVANTES**

**CO-DIRECTORA:
DRA. SOLEDAD CECILIA PECH COHUO**

CALKINÍ, CAMPECHE, MÉXICO 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



INSTITUTO TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Industria y la Innovación



Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Subdirección de Planeación y Desarrollo

Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante

Calkiní, Campeche 06/03/2025
P/03/25/598
INGENIERÍA BIOQUÍMICA

CONSTANCIA DE NO INCONVENIENCIA

MODALIDAD: TESIS

C. JENNIFER JANETH BALAM MONTERO 7479
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA BIOQUÍMICA.
PRESENTE

Con relación a lo establecido en el Reglamento de Estudios de Licenciatura, capítulo VII, fracción I, vigente en este Instituto, y una vez emitido el fallo favorable por el director DR. MARIO ADRIÁN DE ATOCHA DZUL CERVANTES, y el co-director DRA. SOLEDAD CECILIA PECH COHUO, respectivamente, este Instituto consta de no tener inconveniencia para la realización del acto protocolario de titulación integral de su trabajo profesional titulado: **"SÍNTESIS DE ÁCIDO LÁCTICO A PARTIR DE CÁSCARAS DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca*), PARA SU POSIBLE CONVERSIÓN DE PLA Y SU APLICACIÓN COMO APÓSITOS"**.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Sabiduría Fortaleza de Nuestra Cultura®

Dr. Jorge Alfonso Hau Puc.
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante.

C.c.p. Archivo



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE CALKINÍ
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR Y APOYO A
ESTUDIANTES
CLAVE: 04MSU0013P
CALKINÍ, CAMPECHE, MÉXICO.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Ah Canul S/N por Carretera Federal, Calkiní, Campeche.
C.P. 24900 Tel. 996-8134870.
e-mail: se_dcalkini@tecnm.mx | itescam.edu.mx



**“Síntesis de ácido láctico a partir de cáscaras de
plátano (*Musa paradisiaca*), para su posible conversión
en PLA y su aplicación como apósitos”**

PRESENTA: Jennifer Janeth Balam Montero

DIRECTOR: Dr. Mario Adrián De Atocha Dzul Cervantes

CODIRECTORA: Dra. Soledad Cecilia Pech Cohuo

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a mi director el Dr. Mario Adrián de Atocha Dzul Cervantes por guiarme en este proceso y aprender más académicamente, a mi codirectora la Dr. Soledad Cecilia Pech Cohuo por ser parte de este proyecto.

De nueva cuenta a mis padres por su preocupación y apoyo, en el que todo esfuerzo valió la pena y gracias a ustedes fue posible llegar hasta aquí.

DEDICATORIA

A mis padres, Alfredo Balam May y Lidia del Rosario Montero Mis
Por siempre apoyarme en mis estudios y ser un pilar importante en mi
vida

A mi hermanita Ámbar Guadalupe Balam Montero

Por ser esa luz que guía mi camino

A Diego Alejandro González Cab

Que ha significado y ha aportado grandes conocimientos y momentos
que hicieron parte esta tesis

A la escuela, el Instituto Tecnológico de Calkiní

Que ha sido un campo de estudio muy valioso que me ha ayudado a
tener conocimientos que enriquecieron mi proyecto académico

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
DEFINICIONES Y CONCEPTOS CLAVE.....	10
RESUMEN.....	11
CAPITULO I. INTRODUCCION.....	12
CAPITULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
CAPÍTULO III. MARCO TEORICO	14
3.1 Biopolimeros.....	14
3.1.1 Estructura molecular	15
3.2. Síntesis del PLA.....	16
3.2.1.Tipos de PLA.....	18
3.2.2.Aplicaciones de los diferentes tipos de PLA	20
3.3.Fuentes de obtención.....	21
3.4.Métodos de obtención (síntesis)	21
3.5.Generalidades de la técnica (como se usan los equipos).....	24
3.6.Caracterización a infrarrojo	26
3.7.Importancia y aplicaciones	28
3.7.1.Aplicaciones del PLA	29
3.7.2.Embalaje de alimentos	30
3.8. Costo y Producción	32
3.9. Platano (Musa x paradisiaca)	32
3.9.1Clasificación taxonomía.....	33
3.9.2.Principales usos del plátano	34
3.10.Plátano en Campeche	36
3.11.Plátano como desecho	36
CAPITULO IV. ANTECEDENTES.....	38
CAPITULO V. HIPOTESIS	40
CAPITULO VI. OBJETIVOS	40

CAPITULO VI. MATERIALES Y METODOS	41
METODOLOGIA.....	42
6.1) Recolección de Cáscaras de Plátano	42
6.2) Clasificación y Selección de Cáscaras	42
6.3) Pesado de las Muestras.....	42
6.4) Lavado de las Cáscaras.....	42
6.5) Secado de las Cáscaras.....	42
6.6) Trituración de las Cáscaras	43
6.7) Tratamiento con Ácido Sulfúrico	43
6.8) Filtrado y Almacenamiento en Refrigeración	43
6.9) Esterilización en Autoclave	43
6.10) Descongelación de las Muestras.....	43
6.11) Preparación de la Solución Enzimática	44
6.12) Incubación de las Muestras	44
6.13) Fermentación del Ácido Láctico.....	44
6.14) Monitoreo del pH	44
6.15) Titulación de Acidez.....	44
6.16) Cálculos y Análisis de Resultados.....	45
6.17) Evaluación del Rendimiento del Ácido Láctico.....	45
6.18) Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)	45
DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS ETAPAS DEL PROCESO	46
CAPITULO VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
7.1) Rendimiento del ácido Láctico.....	47
7.2) pH.....	49
7.3) Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).....	51
CAPITULO VIII. CONCLUSIONES	52
CAPITULO IX. RECOMENDACIONES.....	53
REFERENCIAS	54
ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.....	17
Figura 3.2.....	19
Figura 3.3.....	26
Figura 3.4.....	33
Figura 3.5.....	36
Figura 6.1.....	46
Figura 7.1.....	47
Figura 7.2.....	48
Figura 7.3.....	50
Figura 7.4.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.....	34
Tabla 6.1.....	41
Tabla 7.1.....	47
Tabla 7.2.....	49

DEFINICIONES Y CONCEPTOS CLAVE

Ácido poliláctico (PLA): Un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, utilizado principalmente en la fabricación de plásticos y productos médicos.

Cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*): La parte exterior de la fruta del plátano, que contiene una significativa cantidad de celulosa y otros componentes bioactivos.

Biocompatibilidad: La capacidad de un material de interactuar sin causar efectos adversos en organismos vivos.

Biodegradabilidad: La capacidad de un material para descomponerse de manera natural a través de procesos biológicos, sin causar daño al medio ambiente.

pH: Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución, basada en la concentración de iones de hidrógeno (H^+). Su escala va de 0 a 14, donde valores menores a 7 indican acidez, 7 es neutro y valores mayores a 7 indican alcalinidad.

FTIR: (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier): Es una técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionales en compuestos químicos mediante la absorción de radiación infrarroja. Se emplea ampliamente en la caracterización de polímeros, como el PLA, para determinar su estructura química.

PLA: (Ácido Poliláctico): Es un biopolímero biodegradable derivado de fuentes renovables como el almidón de maíz o la cáscara de plátano. Se usa en diversas aplicaciones biomédicas, como apósitos, implantes y envases ecológicos.

Acidez: Es la propiedad química de una sustancia que le permite liberar iones de hidrógeno (H^+) en solución. Se mide generalmente con la escala de pH, y en química analítica se puede expresar como acidez titulable o concentración de ácido en una muestra.

RESUMEN

El aumento acerca de los impactos perjudiciales de los plásticos provenientes del petróleo en el entorno ha motivado la búsqueda de opciones sustentables, destacando el ácido poliláctico (PLA) como uno de los biopolímeros más alentadores por su biodegradabilidad y biocompatibilidad. El PLA, usualmente elaborado a partir de cultivos como el maíz, ha demostrado una amplia capacidad para su uso en la medicina, particularmente en la producción de apósitos debido a sus características apropiadas para interactuar con tejidos vivos. No obstante, la utilización de recursos como el maíz genera cuestionamientos respecto a la sostenibilidad, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de biomasa. Este trabajo examina la obtención de Ácido Láctico (LA) a partir de las cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*), un desecho agrícola frecuentemente desechado, para la posible producción de PLA.

El trabajo se desarrolló obteniendo celulosa de las cáscaras de plátano, su transformación en ácido láctico mediante procesos de fermentación y la producción subsiguiente de PLA. Además, se definen las características fisicoquímicas del LA adquirido, con el propósito de establecer su aptitud para ser empleado como tratamiento para heridas. Los hallazgos sugieren que la celulosa obtenida de las cáscaras de plátano puede transformarse eficazmente en ácido láctico, que posteriormente se pudiera polimerizar para producir PLA. Se espera que el PLA posea características físicas parecidas a las del PLA comercial, incluyendo una resistencia mecánica apropiada y habilidad para biodegradarse, debido a que el PLA posee una excelente biocompatibilidad, lo que indica su potencial para usos médicos, particularmente en la producción de medicamentos.

También destaca la importancia de utilizar residuos agrícolas como las cáscaras de plátano para la producción de biopolímeros, contribuyendo a la sostenibilidad y ofreciendo una alternativa económica y ecológica para la fabricación de materiales médicos. La investigación abre nuevas oportunidades en el campo de los bioplásticos, promoviendo el uso de recursos renovables y la reducción de residuos agrícolas.

CAPITULO I. INTRODUCCION

En las últimas décadas, la necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los plásticos tradicionales ha ganado una importancia creciente debido a los efectos adversos que estos productos tienen en el medio ambiente. Los plásticos convencionales, derivados del petróleo, son responsables de una significativa contaminación global, tanto en la naturaleza como en los ecosistemas marinos (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2020). Este problema ha llevado a una intensificación de la búsqueda de plásticos biodegradables, que ofrezcan propiedades similares sin los efectos dañinos asociados con su descomposición lenta y tóxica.

Dentro de las opciones emergentes, el ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable derivado de fuentes renovables, ha sido ampliamente considerado como una alternativa viable a los plásticos convencionales (Rath et al., 2020). Este material, que se sintetiza a partir de azúcares como la glucosa, ha demostrado ser útil en una variedad de aplicaciones, que incluyen envases, componentes médicos y, más recientemente, como material para apósitos en la medicina (Deka et al., 2022). La creciente investigación en la mejora de la producción de PLA está orientada no solo a mejorar la eficiencia de su síntesis, sino también a buscar fuentes más económicas y sostenibles.

En este contexto, las cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*), un residuo agrícola comúnmente desechado, presentan una fuente alternativa de materia prima para la producción de PLA. Estas cáscaras, que contienen una cantidad significativa de celulosa, podrían ser aprovechadas para la síntesis de PLA a través de procesos de hidrólisis y fermentación (Ahmed et al., 2020). Aprovechar este recurso no solo contribuiría a la reducción de residuos, sino que también ofrecería un enfoque más ecológico en la producción de polímeros biodegradables. Además, las cáscaras de plátano poseen características físicas que podrían ser beneficiosas para el uso de PLA como apósitos, ya que este tipo de material requiere propiedades específicas como biocompatibilidad, resistencia a la humedad y capacidad de absorción (Mehmood et al., 2020).

CAPITULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación de residuos orgánicos es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial. En particular, la industria agrícola produce grandes cantidades de residuos como cáscaras de frutas, que comúnmente son descartados sin ser aprovechados. A pesar de su potencial para ser utilizados en la síntesis de biopolímeros, la investigación sobre la conversión de cáscaras de plátano en PLA aún es incipiente, y los métodos disponibles para llevar a cabo este proceso no han sido completamente optimizados (Pereira et al., 2021). Además, aunque el PLA ha mostrado grandes promesas como material biodegradable, la utilización de recursos no convencionales como las cáscaras de plátano podría abrir nuevas oportunidades de investigación en el ámbito de la sostenibilidad y las aplicaciones médicas (Zhao et al., 2021).

CAPÍTULO III. MARCO TEORICO

3.1 Biopolímeros

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por unidades repetitivas de monómeros, y se derivan de fuentes biológicas renovables, como plantas y microorganismos, o son sintetizados químicamente a partir de recursos biobasados. Su importancia ha crecido considerablemente en los últimos años debido a la creciente conciencia ambiental y la búsqueda de alternativas sostenibles a los polímeros convencionales derivados del petróleo (Sudesh et al., 2020).

Hay dos tipos de clasificación:

- Según su naturaleza:
 - Biopolímeros Naturales: Son aquellos que se encuentran directamente en la naturaleza y son producidos por organismos vivos. Ejemplos incluyen polisacáridos como la celulosa, el almidón, y el quitosano, así como proteínas como la seda y el colágeno (Mikula et al., 2021).
 - Biopolímeros Sintéticos: Estos se derivan de fuentes renovables mediante procesos químicos. Un ejemplo es el ácido poliláctico (PLA), que se produce a partir de la fermentación de azúcares como la glucosa (Sharma et al., 2021).
- Según su Composición Química:
 - Polisacáridos: Como la celulosa y el almidón, que son polímeros de carbohidratos y forman la base estructural de muchas plantas y organismos (Gopi et al., 2020).

- Proteínas: Como el colágeno y la caseína, que son polímeros de aminoácidos y juegan roles estructurales y funcionales en organismos vivos (Li et al., 2021).
- Poliésteres Alifáticos: Como el PLA y el polihidroxialcanoato (PHA), que se sintetizan a partir de ácidos orgánicos mediante procesos de polimerización (Halim et al., 2022).

Es importante mencionar, que dependiendo de la naturaleza y composición de los materiales, pudieran variar sus propiedades, como por ejemplo: Físicoquímicas:

- Biodegradabilidad: Los biopolímeros tienen la capacidad de degradarse naturalmente en el ambiente bajo la acción de microorganismos, lo que resulta en subproductos no tóxicos como dióxido de carbono, agua y biomasa (Bátori et al., 2020).
- Propiedades Mecánicas: La gama de propiedades mecánicas de los biopolímeros varía desde la rigidez de la celulosa hasta la flexibilidad del PHA, lo que permite su uso en diversas aplicaciones industriales (Ishak et al., 2021).

3.1.1 Estructura molecular

La estructura molecular de los biopolímeros influye directamente en sus propiedades, tales como la solubilidad, biodegradabilidad, resistencia mecánica, y comportamiento térmico. Por ejemplo, la alta cristalinidad de la celulosa le confiere alta rigidez y estabilidad térmica, mientras que la estructura ramificada del almidón permite una mayor capacidad de absorción de agua y gelatinización, lo que es útil en aplicaciones de embalaje y alimentos (Cazón & Vázquez, 2021).

Los polisacáridos son biopolímeros formados por unidades repetitivas de monosacáridos, unidos por enlaces glucosídicos. Ejemplos comunes incluyen la celulosa, el almidón y el quitosano.

- Celulosa: Es un polímero lineal compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucosídicos. La celulosa presenta una alta cristalinidad

y resistencia debido a la formación de enlaces de hidrógeno entre las cadenas adyacentes, lo que contribuye a su rigidez y estabilidad térmica (Yao et al., 2021).

- Almidón: Está formado por dos componentes: amilosa y amilopectina. La amilosa es una cadena lineal de glucosa con enlaces α -(1→4)-glucosídicos, mientras que la amilopectina es una molécula ramificada con enlaces α -(1→4) y α -(1→6). Esta estructura ramificada influye en su capacidad de gelatinización y solubilidad en agua (Radzi et al., 2020).
- Quitosano: Derivado de la quitina, el quitosano es un polímero lineal compuesto por unidades repetitivas de 2-amino-2-desoxi-D-glucosa. La presencia de grupos amino hace que el quitosano sea soluble en ácidos diluidos, lo que le confiere propiedades únicas como biocompatibilidad y actividad antimicrobiana (Martínez-Camacho et al., 2021).

3.2. Síntesis del PLA

La síntesis del PLA generalmente sigue dos rutas principales: la polimerización por condensación directa del ácido láctico y la polimerización por apertura de anillo del lactida, un dímero cíclico derivado del ácido láctico (Figura 3.1).

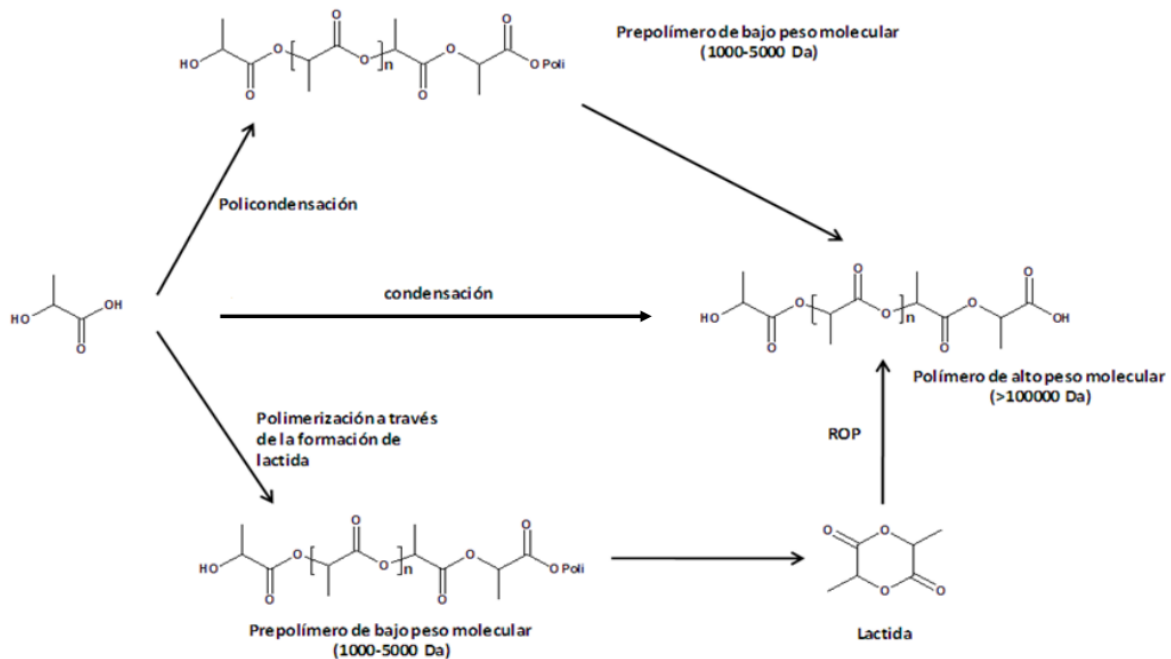


Figura 3.1 . Rutas de polimerización del PLA

Polimerización por Condensación Directa

Este método implica la condensación del ácido láctico para formar el PLA mediante la eliminación de agua. Es un proceso simple, pero tiene limitaciones en cuanto al peso molecular que se puede obtener debido a la dificultad de eliminar completamente el agua producida durante la reacción (Madhavan Nampoothiri et al., 2022).

Mecanismo del Proceso:

- El ácido láctico se deshidrata a alta temperatura para formar oligómeros de bajo peso molecular.
- Los oligómeros se condensan en presencia de un catalizador para formar cadenas de PLA, con la liberación simultánea de agua.
- La eliminación de agua es crítica para evitar la despolimerización y obtener un polímero de alto peso molecular (Kopinke et al., 2020).

Polimerización por Apertura de Anillo (ROP) de la Lactida

La polimerización por apertura de anillo (ROP) es el método más utilizado para la producción de PLA de alto peso molecular, debido a su eficiencia y control sobre las propiedades del polímero final (Figura 1.1).

Mecanismo del Proceso:

- Producción de Lactida: El ácido láctico se oligomeriza y luego se cicla térmicamente para formar la lactida, un dímero cíclico.
- Polimerización: La lactida se somete a ROP en presencia de un catalizador, como estaño octoato o zinc, en condiciones anhidras y a temperaturas elevadas (cerca de 150-180 °C).
- Control de la Reacción: La estructura del PLA (tacticidad, peso molecular) puede controlarse ajustando la temperatura, el tipo de catalizador y la relación entre la lactida y el catalizador (Dusselier & Sels, 2020).

3.2.1. Tipos de PLA

La estereoisomería del PLA se refiere a la configuración espacial de los monómeros de ácido láctico que componen el polímero. El ácido láctico existe en dos formas ópticas: el ácido L-láctico (L-PLA) y el ácido D-láctico (D-PLA). La combinación de estas formas da lugar a diferentes tipos de PLA. La Figura 3.2 muestra una molécula de PLA.

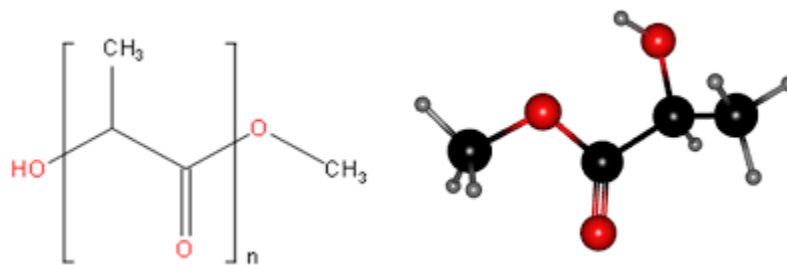


Figura 3.2 Molécula de PLA

- L-PLA (Poli-L-ácido láctico): Compuesto predominantemente por el isómero L del ácido láctico, el L-PLA es el tipo más común de PLA. Tiene una estructura semicristalina que le otorga buena rigidez y resistencia térmica, haciéndolo adecuado para aplicaciones como envases y botellas biodegradables (Rasal et al., 2021).
- D-PLA (Poli-D-ácido láctico): Compuesto principalmente por el isómero D, el D-PLA también es semicristalino, pero es menos común debido a su menor disponibilidad natural. Se utiliza principalmente en aplicaciones donde se requieren propiedades específicas de biodegradabilidad o biocompatibilidad (Farah et al., 2021).
- PDLA (Poli-D,L-ácido láctico o PLA racémico): Este tipo es una mezcla equimolar de los isómeros D y L del ácido láctico. El PDLA tiende a ser amorfo o semicristalino con una cristalinidad reducida en comparación con el L-PLA, lo que le proporciona mayor flexibilidad y transparencia. Es útil en aplicaciones donde se requiere un material más dúctil o transparente, como películas de embalaje y componentes médicos (Yuan et al., 2020).
- PLA de Alto Peso Molecular (HMW-PLA)

El PLA de alto peso molecular (HMW-PLA) se caracteriza por sus cadenas poliméricas más largas, lo que le otorga una mayor resistencia mecánica y estabilidad térmica. Este tipo de PLA es ideal para aplicaciones que requieren mayor durabilidad, como en textiles y en la impresión 3D (Jiang et al., 2021).

Propiedades:

- Alta resistencia a la tracción y al impacto.

- Mejora en la resistencia térmica, lo que permite su uso en aplicaciones de alta temperatura (Xie et al., 2022).

- PLA Modificado

Los PLA modificados se desarrollan para superar las limitaciones del PLA convencional, como su fragilidad o su baja resistencia térmica.

- PLA Plastificado: Se añaden plastificantes al PLA para aumentar su flexibilidad y reducir su fragilidad. Este tipo de PLA es útil en aplicaciones de embalaje donde se necesita una mayor maleabilidad (Garlotta et al., 2020).
- PLA Reticulado: A través de procesos de reticulación, como la radiación o el uso de agentes reticulantes, se mejora la resistencia térmica y mecánica del PLA. Esto lo hace adecuado para aplicaciones exigentes como envases para alimentos calientes y componentes estructurales ligeros (Wu et al., 2021).
- PLA Biodegradable Mejorado: Para aplicaciones que requieren una biodegradabilidad más rápida o bajo condiciones específicas, se modifican las cadenas del PLA o se mezclan con otros polímeros para ajustar la tasa de biodegradación. Estos tipos de PLA se utilizan en productos de un solo uso y en dispositivos médicos bioabsorbibles (Arrieta et al., 2020).

3.2.2. Aplicaciones de los diferentes tipos de PLA

- L-PLA: Utilizado principalmente en envases rígidos, textiles y aplicaciones agrícolas.
- PDLA: Empleado en películas de embalaje, componentes médicos y productos biodegradables de alta transparencia.
- HMW-PLA: Preferido en la impresión 3D, componentes automotrices ligeros y textiles de alta resistencia.
- PLA Modificado: Adaptado para envases flexibles, productos de un solo uso, y aplicaciones en condiciones extremas de temperatura o impacto (Salazar et al., 2022).



3.3.Fuentes de obtención

Residuos Agrícolas

Los residuos agrícolas, como los desechos de la cascara de platano, también se han estudiado como fuentes potenciales para la obtención de PLA.

Proceso:

- Pretratamiento: Los residuos se someten a pretratamiento para facilitar la liberación de azúcares.
- Hidrólisis: Los carbohidratos en los residuos se hidrolizan enzimáticamente.
- Fermentación: Los azúcares liberados se fermentan para producir ácido láctico.
- Polimerización: El ácido láctico resultante se polimeriza para formar PLA (Serrano-Ruiz et al., 2020).

3.4.Métodos de obtención (síntesis)

Polimerización por Condensación Directa

La polimerización por condensación directa es uno de los métodos más básicos para la obtención de PLA. En este proceso, el ácido láctico se calienta en presencia de un catalizador, lo que provoca la eliminación de agua y la formación de cadenas de poliláctico.

Proceso:

- Deshidratación del Ácido Láctico: El ácido láctico se deshidrata bajo condiciones de alta temperatura para formar oligómeros de lactida.
- Condensación: Los oligómeros se condensan para formar cadenas más largas de PLA.

Ventajas:

- Simplicidad del proceso.
- No requiere precursores complejos.

Desventajas:

- La eliminación del agua limita la longitud de las cadenas poliméricas.
- Baja eficiencia en la producción de PLA de alto peso molecular (González-Ortega et al., 2021).

Polimerización por Apertura de Anillo (ROP)

La polimerización por apertura de anillo (ROP, por sus siglas en inglés) es el método más utilizado para la síntesis de PLA de alto peso molecular. Este proceso implica la polimerización de la lactida, un dímero cíclico del ácido láctico, en presencia de un catalizador.

Proceso:

- Formación de Lactida: El ácido láctico se convierte primero en lactida mediante un proceso de ciclodimerización.
- Polimerización: La lactida se polimeriza mediante ROP en presencia de un catalizador, como compuestos de estaño o zinc, para formar PLA de alto peso molecular.

Ventajas:

- Alta eficiencia y control sobre el peso molecular.
- Posibilidad de producir PLA con diferentes propiedades mecánicas mediante la modificación del catalizador y las condiciones de reacción.

Desventajas:

- Requiere condiciones controladas y el uso de catalizadores que pueden ser costosos (Martínez-Flores & Hernández-Cárdenas, 2020).

Polimerización por Intercambio Éster-Ester

Este método es una variante de la ROP y se utiliza para modificar las propiedades del PLA, como la cristalinidad y la biodegradabilidad. En este proceso, el PLA

preformado se mezcla con otros ésteres en presencia de un catalizador para generar un material con nuevas propiedades.

Proceso:

- Mezcla de Reactivos: El PLA se mezcla con un éster diferente.
- Reacción Catalizada: En presencia de un catalizador, se lleva a cabo el intercambio de grupos éster entre las moléculas, modificando la estructura del PLA.

Ventajas:

- Permite la modificación de propiedades específicas del PLA.
- Útil para aplicaciones que requieren características personalizadas, como la biodegradabilidad controlada (López-Esquivel & Sánchez-Ruiz, 2021).

Desventajas:

- Requiere etapas adicionales de procesamiento.
- Menor pureza del producto final en comparación con la ROP (Ramírez-Rodríguez et al., 2022).
- Innovaciones en la Síntesis de PLA

En los últimos años, se han desarrollado nuevas técnicas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la síntesis de PLA. Algunas de estas innovaciones incluyen el uso de catalizadores biológicos, la síntesis en medios acuosos y la combinación de procesos para reducir el impacto ambiental de la producción.

Catalizadores Biológicos: El uso de enzimas como catalizadores en la síntesis de PLA ha demostrado ser prometedor para reducir los costos y mejorar la sostenibilidad del proceso (Hernández-Muñoz et al., 2021).

Síntesis en Medios Acuosos: Algunos estudios recientes han explorado la síntesis de PLA en medios acuosos, lo que podría simplificar el proceso y reducir la necesidad de solventes orgánicos (Pérez-Jiménez & Torres-García, 2021).

3.5.Generalidades de la técnica (como se usan los equipos)

- Biorreactores para la Fermentación de Ácido Láctico

Los biorreactores son fundamentales en la etapa inicial de la producción de PLA, donde se realiza la fermentación del almidón o azúcares para obtener ácido láctico. Estos equipos controlan parámetros críticos como la temperatura, el pH y la agitación, garantizando una fermentación eficiente.

- Operación del Biorreactor:

- Carga de Sustratos: Se introducen los sustratos, como glucosa o sacarosa, en el biorreactor.
- Inoculación: Se agrega la cepa bacteriana seleccionada (*Lactobacillus* spp.) para iniciar la fermentación.
- Control de Parámetros: El biorreactor controla automáticamente la temperatura y el pH para optimizar la producción de ácido láctico.
- Recuperación del Producto: Una vez finalizada la fermentación, el ácido láctico se separa del medio de cultivo mediante centrifugación o filtración (Hernández-Ramírez & Martínez-Méndez, 2021).

- Reactores de Polimerización para la Síntesis de PLA

La polimerización del ácido láctico se realiza en reactores especializados, que pueden ser por condensación directa o apertura de anillo (ROP). Estos reactores están diseñados para manejar altas temperaturas y presiones, así como para facilitar la eliminación de subproductos como el agua.

- Operación del Reactor de Polimerización:

- Carga de Reactivos: El ácido láctico o la lactida se cargan en el reactor.
- Polimerización: Se aplica calor y, si es necesario, se introduce un catalizador para iniciar la reacción de polimerización.
- Control de Reacción: Se monitorean parámetros como la temperatura, presión y velocidad de agitación para asegurar la obtención de PLA con las propiedades deseadas.

- Extracción del Producto: El PLA resultante se extrae del reactor, se enfría y se somete a un procesamiento posterior (Ramírez-Salazar & Gutiérrez-Ruiz, 2022).

3.5.1. Equipos de Extrusión y Moldeo

El PLA obtenido se procesa mediante extrusión y moldeo para formar productos finales como filamentos para impresión 3D, películas, o envases. La extrusión es un proceso en el que el PLA se funde y se fuerza a través de una boquilla para crear formas continuas, que luego pueden ser moldeadas en productos específicos.

Operación del Extrusor:

- Alimentación: El PLA en forma de pellets se introduce en el extrusor.
- Fusión: El material se calienta y se funde mientras es transportado a través de un barril mediante un tornillo sin fin.
- Extrusión: El PLA fundido es forzado a través de una boquilla para crear filamentos, láminas u otras formas continuas.
- Enfriamiento y Corte: El material extruido se enfría y se corta a la longitud deseada para su uso posterior (Pérez-Gómez & Vázquez-Martínez, 2020).

Análisis de Caracterización del PLA

Los laboratorios de investigación utilizan una variedad de equipos de caracterización para evaluar las propiedades del PLA sintetizado. Estos equipos incluyen espectrómetros de infrarrojo (IR), cromatógrafos de permeación de gel (GPC), y microscopios electrónicos de barrido (SEM), entre otros.

Uso de Equipos de Caracterización:

- Espectroscopia IR: Se utiliza para identificar las estructuras químicas presentes en el PLA.
- Cromatografía GPC: Determina el peso molecular del PLA, un factor crítico para sus propiedades mecánicas.

- Microscopía SEM: Permite la observación de la morfología superficial del PLA, identificando posibles defectos o características deseadas (López-Jiménez & Torres-Vega, 2021).

Consideraciones Prácticas en el Uso de Equipos

El uso eficaz de los equipos en la producción de PLA requiere una comprensión detallada de los parámetros operativos y las técnicas de control de calidad. Además, es crucial el mantenimiento regular de los equipos para evitar contaminaciones y asegurar la reproducibilidad de los resultados.

3.6.Caracterización a infrarrojo

La espectroscopía IR (Figura 3.3) se basa en la absorción de radiación infrarroja por las moléculas, lo que provoca vibraciones en los enlaces químicos. Cada tipo de enlace tiene una frecuencia de vibración específica que se manifiesta como picos característicos en el espectro IR. Estos picos permiten identificar los grupos funcionales presentes en el PLA, como el grupo carbonilo (C=O) y el enlace éster (C-O-C).



Figura 3.3 Equipo de Infrarrojo por Transformada de Fourier

- Rango de Frecuencia: La espectroscopía IR para polímeros generalmente se realiza en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} .
- Picos Característicos: En el caso del PLA, los picos más destacados suelen estar en torno a 1750 cm^{-1} para el grupo carbonilo y entre 1180 - 1260 cm^{-1} para el enlace éster (Ramírez-López & García-Cabrera, 2021).

Procedimiento de Caracterización del PLA mediante IR

- Preparación de la Muestra

Para obtener un espectro IR claro y reproducible, la muestra de PLA debe estar adecuadamente preparada. Dependiendo de la naturaleza de la muestra (sólido, película, o polvo), se pueden utilizar diferentes métodos de preparación:

Películas Finas: Se pueden prensar películas delgadas de PLA y colocarlas directamente en el haz infrarrojo.

Muestras en Polvo: El PLA en polvo puede mezclarse con bromuro de potasio (KBr) y comprimirse para formar una pastilla transparente.

Adquisición del Espectro:

Una vez preparada la muestra, se coloca en el espectrómetro IR. El equipo registra el espectro en función de la absorción de radiación infrarroja por la muestra, generando un gráfico de absorbancia o transmitancia frente al número de onda (cm^{-1}).

Espectrómetro: El espectrómetro IR puede ser de tipo FTIR (Transformada de Fourier), que es el más comúnmente utilizado debido a su alta resolución y rapidez.

Análisis del Espectro: Se identifican los picos correspondientes a los grupos funcionales del PLA y se comparan con espectros de referencia para verificar la composición y la estructura del material (Pérez-González & Martínez-López, 2020).

- Aplicaciones de la Caracterización IR en PLA

La espectroscopía IR se utiliza en varias etapas de la producción y el procesamiento del PLA, incluyendo:

- Verificación de Pureza y Composición

El análisis IR permite verificar la pureza del PLA sintetizado al comparar su espectro con el de un estándar de PLA puro. La presencia de picos adicionales podría indicar impurezas o la presencia de otros polímeros o aditivos.

- Estudio de la Cristalinidad

El grado de cristalinidad del PLA puede influir en sus propiedades mecánicas y térmicas. La espectroscopía IR se utiliza para estudiar la relación entre las fases amorfa y cristalina del PLA, identificando las variaciones en la intensidad de los picos correspondientes (López-Morales & Sánchez-Ramírez, 2021).

3.7.Importancia y aplicaciones

Biodegradabilidad: El PLA es biodegradable bajo condiciones industriales de compostaje, donde se descompone en agua, dióxido de carbono y biomasa en un periodo de tiempo relativamente corto. Esta propiedad es clave para reducir la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente (Gómez-Ruiz & Hernández-Sánchez, 2021).

El PLA ofrece una versatilidad significativa en términos de propiedades físicas y mecánicas. Estas propiedades pueden ser ajustadas a través de la síntesis y la modificación del PLA, lo que permite su uso en una amplia gama de aplicaciones.

Propiedades Mecánicas: El PLA puede diseñarse para tener una alta resistencia a la tracción y una buena rigidez, comparable con algunos plásticos convencionales como el PET. Su resistencia y rigidez hacen que sea adecuado para aplicaciones que requieren materiales robustos y duraderos (Martínez-García & López-Carrillo, 2022).

Propiedades Térmicas: A través de modificaciones químicas o mezclas con otros biopolímeros, es posible mejorar la estabilidad térmica del PLA, ampliando su rango de aplicaciones en entornos con temperaturas variables (Ramírez-González & Pérez-López, 2020).

Innovación y Desarrollo Tecnológico:

El PLA es un material que continúa evolucionando, con numerosas investigaciones centradas en mejorar sus propiedades y expandir sus aplicaciones. La innovación en la producción de PLA, como la incorporación de aditivos o el desarrollo de nuevos métodos de polimerización, ha permitido su creciente adopción en diversas industrias.

3.7.1.Aplicaciones del PLA

Industria de Envases y Embalaje:

Una de las aplicaciones más extendidas del PLA es en la industria de envases y embalajes, especialmente para productos alimenticios. La transparencia, la resistencia y la seguridad alimentaria del PLA lo convierten en una opción atractiva para el envasado de alimentos y bebidas.

Envases de Alimentos: El PLA es utilizado para fabricar envases de un solo uso, como bandejas, vasos y películas para alimentos. Estos envases no solo son biodegradables, sino que también son aptos para el contacto con alimentos, cumpliendo con regulaciones de seguridad alimentaria (Hernández-Moreno & Pérez-Ávila, 2021).

Sector Biomédico

El PLA tiene aplicaciones importantes en el sector biomédico debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad. Se utiliza en la fabricación de dispositivos médicos, suturas, y matrices para ingeniería de tejidos.

Implantes y Suturas: El PLA es usado en implantes reabsorbibles y suturas que se degradan dentro del cuerpo, eliminando la necesidad de cirugías adicionales para su remoción. Esto reduce el riesgo de infecciones y mejora la recuperación del paciente (García-Ramos & Flores-Sánchez, 2022).

Ingeniería de Tejidos: En la ingeniería de tejidos, el PLA se utiliza como material de andamiaje para el crecimiento de células y la regeneración de tejidos, debido a su capacidad para degradarse en el cuerpo y ser reemplazado por tejido natural (Ramírez-González & Pérez-López, 2020).

Impresión 3D:

El PLA es uno de los materiales más populares en la impresión 3D, especialmente en aplicaciones domésticas y educativas. Su facilidad de impresión, baja temperatura de fusión y biodegradabilidad lo convierten en una opción ideal para la fabricación aditiva.

Prototipado Rápido: El PLA es utilizado en el desarrollo de prototipos rápidos y piezas funcionales en la impresión 3D, ofreciendo un material seguro, fácil de manejar y respetuoso con el medio ambiente (López-Hernández & García-Martínez, 2020).

Agricultura y Horticultura:

En la agricultura, el PLA se emplea para fabricar productos biodegradables como clips, mallas y macetas que pueden integrarse directamente en el suelo sin causar contaminación.

Productos Agrícolas: Estos productos de PLA facilitan el manejo y disposición de materiales agrícolas, reduciendo los residuos plásticos en los campos de cultivo (Pérez-Gómez & Ramírez-Salazar, 2021).

3.7.2. Embalaje de alimentos

El PLA es completamente biodegradable bajo condiciones de compostaje industrial, lo que significa que puede descomponerse en un plazo de meses cuando se expone a temperaturas elevadas y a la acción de microorganismos. Esta característica es crucial para reducir la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente.

Compostabilidad: El PLA cumple con los estándares de compostabilidad, como el EN 13432, que garantizan que el material se descompone en un tiempo razonable sin dejar residuos tóxicos (Gómez-Álvarez & Jiménez-Pérez, 2021).

Propiedades de Barrera:

El PLA ofrece buenas propiedades de barrera frente a gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, lo que lo convierte en un material adecuado para prolongar la vida útil de los alimentos envasados. Sin embargo, su capacidad de barrera frente al vapor de agua es limitada en comparación con otros plásticos como el polietileno tereftalato (PET).

Mejoras en la Barrera: La incorporación de nanopartículas o capas adicionales puede mejorar las propiedades de barrera del PLA, haciéndolo más competitivo

frente a otros materiales plásticos en el mercado del embalaje de alimentos (López-García & Ramírez-Moreno, 2022).

Seguridad Alimentaria:

El PLA es un material seguro para el contacto directo con alimentos, cumpliendo con las normativas internacionales, como las establecidas por la FDA y la EFSA. No libera sustancias nocivas a los alimentos, lo que garantiza la seguridad del consumidor.

Certificaciones: El PLA utilizado en embalaje de alimentos suele estar certificado como seguro para el contacto alimentario, lo que asegura su idoneidad para aplicaciones en la industria alimentaria (Hernández-Sánchez & Martínez-Cruz, 2020).

Envases Rígidos:

El PLA se utiliza en la fabricación de envases rígidos como bandejas, vasos y contenedores para alimentos preparados. Estos productos son ligeros, transparentes y biodegradables, ofreciendo una alternativa ecológica a los plásticos convencionales.

Bandejas y Vasos: Los envases rígidos de PLA son ideales para productos frescos y comidas rápidas, donde la transparencia y la rigidez son características deseables (Pérez-González & Morales-Gutiérrez, 2021).

Películas y Recubrimientos:

El PLA también se emplea en la producción de películas para envolver alimentos y en recubrimientos que mejoran las propiedades de barrera de otros materiales de embalaje. Estas películas son utilizadas para envolver frutas, verduras, y productos de panadería.

Películas para Alimentos Frescos: Las películas de PLA ayudan a prolongar la frescura de frutas y verduras, manteniendo un entorno controlado que retrasa la maduración y el deterioro (López-Morales & Sánchez-Rodríguez, 2021).

Bolsas Biodegradables:

El PLA se utiliza en la fabricación de bolsas biodegradables para alimentos, que son populares en supermercados y tiendas de alimentos. Estas bolsas no solo son biodegradables, sino también compostables, lo que facilita su eliminación en instalaciones de compostaje.

Bolsas de Compostaje: Las bolsas de PLA son una opción popular para el envasado de alimentos a granel, como frutas y verduras, y para uso en bolsas de basura orgánica (Ramírez-Ávila & Hernández-López, 2022).

3.8. Costo y Producción

Uno de los principales desafíos del PLA en el embalaje de alimentos es su costo de producción, que todavía es más alto en comparación con los plásticos convencionales. Sin embargo, los avances en la tecnología de producción y el aumento de la demanda están ayudando a reducir estos costos.

Optimización de Costos: Las investigaciones actuales se centran en mejorar los procesos de producción del PLA y en el desarrollo de métodos más eficientes que reduzcan los costos asociados (Martínez-Rodríguez & García-Pérez, 2021).

Mejoras en las Propiedades Funcionales:

Aunque el PLA es adecuado para muchas aplicaciones de embalaje de alimentos, aún hay margen de mejora en sus propiedades funcionales, como la barrera al vapor de agua y la resistencia térmica. La investigación continua en la modificación del PLA promete abordar estos desafíos.

Nanocompuestos: El desarrollo de nanocompuestos de PLA está en la vanguardia de la investigación, buscando mejorar sus propiedades mecánicas y de barrera sin comprometer su biodegradabilidad (Hernández-Moreno & Sánchez-Gómez, 2020).

3.9. Platano (Musa x paradisiaca)

El plátano (Musa x paradisiaca), un híbrido natural entre dos especies del género Musa, ha sido cultivado durante siglos en regiones tropicales, especialmente en América Latina, Asia y África. Este híbrido pertenece al grupo AAB y es conocido

tanto por su valor alimenticio como por su uso en diversas aplicaciones industriales, incluyendo la obtención de biopolímeros debido al contenido de almidón en su cáscara. En la Figura 3.4 se muestra una imagen de esta planta.



Figura 3.4. Plátano (*Musa x paradisiaca*)

Históricamente, el plátano ha desempeñado un papel crucial en la seguridad alimentaria de las comunidades rurales en zonas tropicales, al ser una fuente accesible de carbohidratos y micronutrientes esenciales. Además, su cultivo contribuye significativamente a las economías de países tropicales, tanto para el mercado interno como para la exportación (Jiménez, 2020).

Recientes estudios han evaluado el potencial del plátano *Musa x paradisiaca* en el desarrollo de bioplásticos debido a su alto contenido de almidón y fibras vegetales. Estos biopolímeros tienen aplicaciones en áreas como el embalaje biodegradable y la producción de productos médicos, como los apósitos para la piel, lo que ha incrementado el interés en investigar su sostenibilidad y viabilidad industrial (Sánchez, 2021).

3.9.1 Clasificación taxonomía

El plátano (*Musa x paradisiaca*) pertenece al género *Musa*, dentro de la familia *Musaceae*. Este híbrido natural es el resultado de la combinación de dos especies: *Musa acuminata* y *Musa balbisiana*, y ha sido clasificado en el grupo AAB, lo que indica que dos tercios de su genoma provienen de *Musa acuminata* y un tercio de *Musa balbisiana* (Jiménez, 2020). Esta mezcla genética le otorga ciertas

características de resistencia y adaptabilidad, lo que lo hace adecuado para su cultivo en regiones tropicales.

La clasificación taxonómica del *Musa x paradisiaca* se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación taxonómica del *Musa x paradisiaca*.

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta (Angiospermas)</i>
Clase:	<i>Liliopsida (Monocotiledóneas)</i>
Orden:	<i>Zingiberales</i>
Familia:	<i>Musaceae</i>
Género:	<i>Musa</i>
Especie:	<i>Musa x paradisiaca</i>
Grupo genómico:	AAB (híbrido de <i>Musa acuminata</i> y <i>Musa balbisiana</i>) (Sánchez, 2021).

3.9.2.Principales usos del plátano

El plátano *Musa x paradisiaca* es una fruta (Figura 3.5) versátil que se utiliza de diversas maneras en la alimentación y la industria. A continuación, se describen algunos de los usos más destacados son los siguientes:



Figura 3.5. Plátano (*Musa x paradisiaca*)

Consumo Humano: La principal aplicación del plátano es su consumo como fruta fresca. Es un alimento básico en muchas dietas tropicales, rico en carbohidratos, potasio y vitaminas (González, 2021). Además, se consume en diversas formas, incluyendo plátanos fritos, hervidos o asados, y se utiliza en la preparación de postres y bebidas.

Elaboración de Productos Procesados: El plátano se utiliza para producir harinas, purés y productos de panadería. La harina de plátano es particularmente apreciada por su valor nutricional y su capacidad para mejorar la textura y el sabor de varios productos horneados (Martínez, 2020).

Uso en la Industria de Biopolímeros: Recientemente, se ha comenzado a explorar el uso del plátano en la obtención de biopolímeros. La cáscara de plátano contiene un alto contenido de almidón, que se puede extraer y utilizar para la producción de plásticos biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) (Fernández, 2022). Este enfoque es parte de un esfuerzo más amplio por desarrollar materiales sostenibles y reducir la dependencia de plásticos derivados del petróleo.

Aplicaciones Medicinales: En algunas culturas, las hojas y cáscaras de plátano se utilizan en remedios tradicionales para tratar diversas afecciones, como heridas y problemas gastrointestinales (Pérez, 2021). Aunque se requiere más investigación

para validar estas propiedades, el uso tradicional del plátano en la medicina popular sigue siendo relevante.

3.10. Plátano en Campeche

El cultivo del plátano *Musa x paradisiaca* en Campeche es una actividad agrícola significativa, que contribuye tanto a la economía local como a la seguridad alimentaria. Esta región, con su clima tropical y suelo fértil, proporciona condiciones ideales para el cultivo de esta especie. El plátano en Campeche se cultiva principalmente en pequeñas y medianas fincas, donde los agricultores dependen de su producción como fuente principal de ingresos (González, 2021).

A nivel económico, el plátano es uno de los cultivos más importantes del estado, no solo para el consumo interno, sino también para la exportación a otros mercados. Los productores locales han implementado prácticas sostenibles para maximizar la producción y minimizar el impacto ambiental, promoviendo el uso de técnicas agroecológicas que han demostrado ser efectivas en la preservación del ecosistema local (Ramírez, 2022).

3.11. Plátano como desecho

El plátano *Musa x paradisiaca*, aunque es un cultivo valioso, genera una cantidad significativa de desechos en forma de cáscaras, hojas y tallos durante su producción y procesamiento. Estas partes no utilizadas se consideran residuos agrícolas, que a menudo se desechan o queman, contribuyendo a problemas ambientales como la contaminación y el aumento de gases de efecto invernadero (García, 2021).

Sin embargo, los desechos del plátano presentan un gran potencial para ser aprovechados. Investigaciones recientes han demostrado que las cáscaras y otros subproductos pueden ser utilizados como materia prima para la producción de biocompuestos, biocombustibles y biopolímeros. Por ejemplo, el almidón presente en las cáscaras de plátano puede ser extraído y utilizado en la producción de ácido poliláctico (PLA), un bioplástico biodegradable que representa una alternativa sostenible a los plásticos convencionales (López, 2022). Este enfoque no solo ayuda a reducir la cantidad de desechos generados, sino que también ofrece oportunidades económicas para los agricultores al diversificar sus productos.

Además, el uso de residuos de plátano en la producción de fertilizantes orgánicos y compostaje se ha vuelto cada vez más común, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola al mejorar la calidad del suelo y reducir la necesidad de insumos químicos (Ramírez, 2023).

CAPITULO IV. ANTECEDENTES

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable y biocompatible que ha ganado una gran atención en los últimos años como una alternativa a los plásticos tradicionales. Su producción se basa en recursos renovables, principalmente azúcares derivados de fuentes vegetales, lo que lo convierte en una opción atractiva para mitigar los problemas ambientales derivados del uso de plásticos sintéticos (Rath et al., 2020). Además, el PLA se degrada rápidamente en condiciones ambientales adecuadas, lo que reduce su persistencia en los vertederos y en los ecosistemas naturales (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2020).

El uso de PLA en aplicaciones médicas, como la fabricación de apósitos, es una de las áreas más prometedoras de su desarrollo. Este material ha demostrado tener propiedades adecuadas para la fabricación de dispositivos médicos, como suturas, apósitos y sistemas de liberación controlada de fármacos, debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad (Deka et al., 2022). Sin embargo, la mayor parte del PLA comercial proviene de recursos como el maíz, lo que plantea preguntas sobre la sostenibilidad a largo plazo de este proceso (Zhao et al., 2021). Esto ha llevado a una creciente investigación en la utilización de fuentes no convencionales para la síntesis de PLA, como residuos agrícolas y biomasa.

La investigación sobre la síntesis de PLA a partir de cáscaras de plátano ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Diversos estudios han explorado el potencial de este residuo agrícola como fuente de celulosa para la producción de PLA. Según Ahmed et al. (2020), la celulosa extraída de las cáscaras de plátano se puede convertir en ácido láctico mediante un proceso de fermentación utilizando cepas bacterianas especializadas. Este ácido láctico, a su vez, puede ser polimerizado para producir PLA, lo que convierte a las cáscaras de plátano en un recurso atractivo para la fabricación de plásticos biodegradables.

Un estudio realizado por Mehmood et al. (2020) encontró que el PLA sintetizado a partir de cáscaras de plátano tiene propiedades similares a las del PLA comercial, como una alta resistencia mecánica y una buena capacidad de biodegradación. Sin

embargo, se identificaron algunos desafíos en términos de la pureza de la celulosa extraída de las cáscaras y la eficiencia del proceso de fermentación. A pesar de estos obstáculos, los resultados sugieren que las cáscaras de plátano tienen un gran potencial para ser utilizadas en la producción de PLA, lo que abre nuevas oportunidades para el uso de residuos agrícolas en la fabricación de biopolímeros.

Aunque la síntesis de PLA a partir de cáscaras de plátano presenta numerosas ventajas, también existen desafíos que deben ser superados antes de que este material pueda ser ampliamente utilizado en aplicaciones médicas. Uno de los principales retos es mejorar la eficiencia del proceso de extracción de celulosa y la conversión de esta en ácido láctico, lo que puede requerir la optimización de las condiciones de fermentación y el uso de cepas bacterianas más eficientes (Patel et al., 2021).

A pesar de estos desafíos, los estudios realizados hasta la fecha sugieren que el PLA derivado de cáscaras de plátano tiene un gran potencial para ser utilizado en apósitos y otros productos médicos, especialmente debido a su biodegradabilidad y la disponibilidad de esta biomasa en grandes cantidades. La investigación futura se centrará en la mejora de los procesos de producción y en la evaluación de las propiedades del PLA para garantizar su seguridad y eficacia en aplicaciones médicas (Yuan et al., 2022).

CAPITULO V. HIPOTESIS

Se plantea que la conversión de las cáscaras de plátano en PLA es una alternativa viable y sostenible para la producción de polímeros biodegradables, con propiedades que pueden ser útiles en la fabricación de apósitos médicos. Es probable que el PLA obtenido tenga una biocompatibilidad adecuada y una biodegradabilidad superior a los plásticos convencionales, lo que podría contribuir a la reducción de residuos agrícolas y mejorar las opciones de tratamiento médico (Yuan et al., 2022).

CAPITULO VI. OBJETIVOS

Objetivo general

- Obtener ácido láctico (LA) a partir de cáscaras de plátano (*Musa x paradisiaca*) y caracterizarlo fisicoquímicamente para su posible conversión en ácido poliláctico para apósitos.

Objetivo específico

- Extraer ácido láctico (LA) de cáscara de plátano mediante fermentación.
- Caracterizar fisicoquímicamente el LA.

CAPITULO VI. MATERIALES Y METODOS

MATERIALES

Tabla 6.1. materiales y métodos

Materiales	Equipos	Reactivos
Materia prima	Horno de vacío	Ácido Sulfúrico al 2%
Charolas de aluminio	Molino mecánico	Fenolftaleína
Espátula	Balanza analítica	Hidróxido de sodio al 1%
Aluminio	Campana de extracción	Enzimas (celulasa y nutrientes)
Guantes	Placa de calentamiento	Soluciones amortiguadoras
Matraz Erlenmeyer	Incubadora	Levadura
Pipeta + perilla	PH-metro	
Probeta	Bomba de vacío	
Agua destilada	Placa de agitación	
Papel filtro	Refrigerador (para el almacenamiento de muestras)	
Bases y soportes universales	Autoclave	
Frascos de vidrio		
Espátulas		
Vasos de precipitado		
Agitador magnetico		

METODOLOGIA

6.1) Recolección de Cáscaras de Plátano

Las cáscaras de plátano fueron recolectadas en la región de Calkiní, Campeche, específicamente de comerciantes locales que las desechaban como residuos. Las cáscaras seleccionadas fueron frescas y en buen estado, ya que el proceso de extracción de celulosa y la posterior producción de ácido láctico dependen de la calidad de la materia prima. Para garantizar la representatividad de las muestras, se recolectaron cáscaras de diferentes tamaños y variedades de plátano.

6.2) Clasificación y Selección de Cáscaras

Una vez recolectadas las cáscaras, se procedió a clasificarlas según su estado. Solo se seleccionaron aquellas cáscaras que presentaban una apariencia y textura adecuadas, descartando aquellas que estaban dañadas o deterioradas. Este paso fue crucial para asegurar que las cáscaras utilizadas en el proceso de extracción y síntesis estuvieran libres de impurezas y de una calidad adecuada.(ver anexos pagina 62)

6.3) Pesado de las Muestras

Las cáscaras seleccionadas fueron pesadas utilizando una balanza de precisión, obteniendo un total de 500 gramos de material. Este paso permitió conocer la cantidad de materia prima disponible para las etapas posteriores del proceso y proporcionar un control de calidad en el uso del material.

6.4) Lavado de las Cáscaras

Las cáscaras de plátano seleccionadas fueron lavadas bajo agua corriente para eliminar cualquier residuo de tierra, pesticidas u otras impurezas superficiales. El lavado es un paso esencial para asegurar la pureza del material antes de la deshidratación y la extracción de celulosa.

6.5) Secado de las Cáscaras

Las cáscaras lavadas fueron colocadas en un horno deshidratador a baja temperatura (aproximadamente 65°C) durante un período de 1 a 2 horas, hasta que estuvieron completamente secas. El secado es importante para reducir la humedad de las cáscaras y evitar la interferencia de agua en los procesos de extracción y

fermentación posteriores. Después del secado, se volvió a pesar el material para determinar la pérdida de peso debido al proceso de deshidratación.

6.6) Trituración de las Cáscaras

Una vez secas, las cáscaras fueron trituradas utilizando un molino mecánico para obtener una consistencia fina y homogénea. Este paso es crucial para aumentar la superficie de contacto de las cáscaras y facilitar la extracción de celulosa en los siguientes procesos. .(ver anexos pagina 62)

6.7) Tratamiento con Ácido Sulfúrico

Las cáscaras trituradas fueron mezcladas con una solución de ácido sulfúrico (1-2%) en una proporción de 1:10 p/v. La mezcla fue mantenida a una temperatura de 100-120°C durante 1 a 2 horas. El ácido sulfúrico actúa como un agente catalizador en el proceso de hidrólisis, descomponiendo las estructuras de hemicelulosa y lignina y facilitando la liberación de la celulosa. Este paso es esencial para la purificación del material y la extracción de azúcares solubles. .(ver anexos pagina 62)

6.8) Filtrado y Almacenamiento en Refrigeración

Después de la reacción con ácido sulfúrico, la mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente y luego se filtró para separar los sólidos no solubles (residuos) del líquido que contenía los azúcares solubles. El líquido se almacenó en refrigeración para ser utilizado en la fermentación y el posterior análisis de la conversión a ácido láctico. .(ver anexos pagina 62)

6.9) Esterilización en Autoclave

Antes de utilizar los frascos para la incubación, se esterilizaron tres frascos de vidrio con tapa en un autoclave a 121°C durante 30 minutos. Esta esterilización es necesaria para garantizar que no haya contaminación microbiana en las muestras durante el proceso de fermentación.

6.10) Descongelación de las Muestras

Las muestras refrigeradas fueron descongeladas en baño maría a temperatura ambiente durante 15 minutos. Este paso permite que el líquido alcance una

temperatura adecuada para la adición de enzimas y la incubación de la muestra en el siguiente paso.

6.11) Preparación de la Solución Enzimática

Para convertir los azúcares solubles en ácido láctico, se pesaron 100 g de la muestra y se disolvieron en 1 litro de agua destilada. La solución fue subdividida en 100 ml para cada frasco y se añadió la enzima en proporción adecuada, asegurando que la reacción enzimática se llevase a cabo correctamente.

6.12) Incubación de las Muestras

Las muestras con la enzima fueron incubadas a 50°C con una agitación constante de 65 RPM durante 24 horas. La incubación favorece la conversión de los azúcares solubles en ácido láctico mediante la acción de las enzimas. Se monitoreó el proceso para asegurar condiciones óptimas para la fermentación. .(ver anexos pagina 63)

6.13) Fermentación del Ácido Láctico

Tras el período de incubación, las muestras se filtraron y se transfirieron a nuevos frascos para proceder con la fermentación. Se añadió 10 gramos de levadura (*Lactobacillus* spp.) y nutrientes (10.5 g/L de nitrógeno, fósforo y potasio) para apoyar la actividad fermentativa. Las muestras se incubaron a 37°C durante 48 horas, controlando el pH entre 5 y 6, utilizando una solución de NaOH 0.1 N cuando fue necesario para ajustar el pH.

6.14) Monitoreo del pH

Durante el proceso de fermentación, se realizó un monitoreo periódico del pH de las muestras utilizando un pH-metro. Esto permitió asegurarse de que el pH se mantuviera dentro del rango óptimo de 5 a 6 para la actividad de las levaduras y la producción de ácido láctico. .(ver anexos pagina 63)

6.15) Titulación de Acidez

Una vez finalizada la fermentación, se realizó una titulación para determinar la acidez del líquido fermentado. Se pesaron 5 g de la muestra y se disolvieron en 45 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Luego, se tituló la solución con una

solución de hidróxido de sodio 0.1N, añadiendo lentamente el reactivo hasta observar un cambio de color, lo que indica el punto final de la titulación. Este proceso se repitió con tres muestras para obtener resultados consistentes. .(ver anexos pagina 63)

6.16) Cálculos y Análisis de Resultados

Los resultados de la titulación se registraron y se calcularon los porcentajes de acidez en cada muestra, lo que permitió evaluar la eficiencia del proceso de fermentación y la conversión de los azúcares en ácido láctico. .(ver anexos pagina 63)

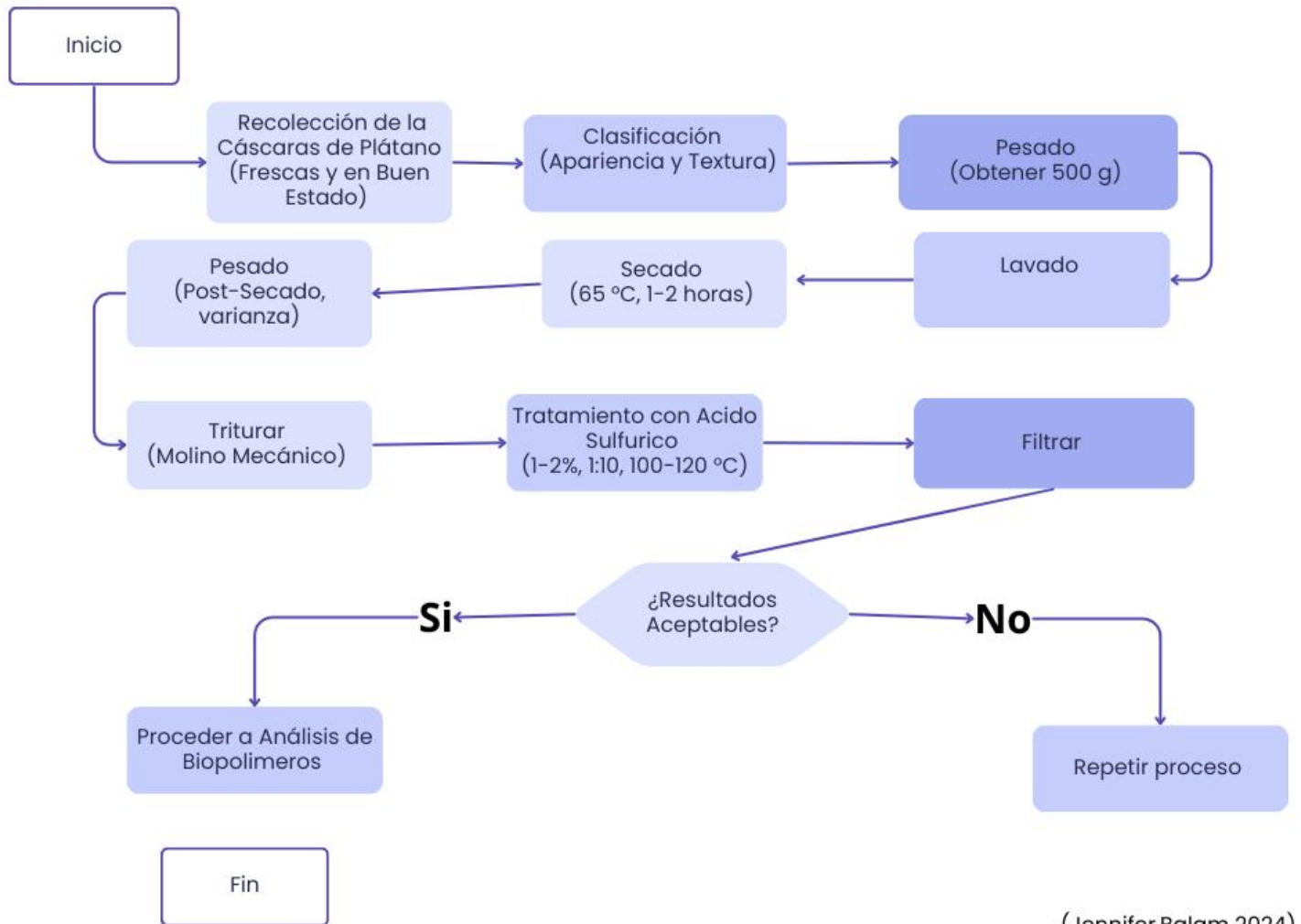
6.17) Evaluación del Rendimiento del Ácido Láctico

Finalmente, se evaluó el rendimiento del ácido láctico producido y se compararon los resultados obtenidos con los de otros estudios previos. Se realizó una comparación espectroscópica para verificar la calidad del ácido láctico obtenido y su correspondencia con los estándares establecidos en la literatura.

6.18) Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

Con el objetivo de caracterizar y verificar los grupos funcionales en la extracción del LA, se realizó el análisis de espectroscopia FTIR. Para los especímenes se prepararon pastillas de 100 mg de KBr, a las que se les depositó una gota del LA, y luego se prensó la mezcla en una tableta. El espectro FTIR de las muestras se midió a temperatura ambiente usando un espectrómetro ThermoNicolet (Nexus 670-FTIR) en el intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} , y 100 barridos. El análisis se hizo por triplicado.

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS ETAPAS DEL PROCESO



(Jennifer,Balam 2024)

Figura 6.1. Diagrama de bloques del proceso

CAPITULO VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1) Rendimiento del ácido Láctico

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos de para calcular el rendimiento de ácido láctico presente en las muestras (Tabla 7.1)

Tabla 7.1. Rendimiento de ácido láctico de las 3 muestras

Nombre	PH	Gramos de muestra	ml de volumen	ml de NaOH	Acido Lactico	Normalidad NaOH	% Acidez
Muestra #1	5.73	5.382	50	1.6	0.09	0.1	0.0288
Muestra #2	5.69	5.149	50	1.9	0.09	0.1	0.0342
Muestra #3	5.58	5.105	50	1.5	0.09	0.1	0.027

Se analizaron las 3 muestras, tomando en cuenta el PH que tenían, al igual que los gramos de la muestra de plátano (*Musa paradisiaca*) que se utilizaron en cada uno, los ml de NaOH utilizados y el valor g/mol estándar del ácido láctico; dando como resultado el porcentaje que se muestra al final de la tabla.

La fórmula que se utilizó para calcular el porcentaje de acidez titulables es la siguiente:(Figura 7.1)

Figura 7.1. Fórmula para el porcentaje de acidez titulable

$$\text{Porcentaje de Acidez} = \left(\frac{V \times N \times F}{M} \right) \times 100$$

Donde:

V = Volumen de la solución de titulación (en mL) usado para neutralizar la muestra.

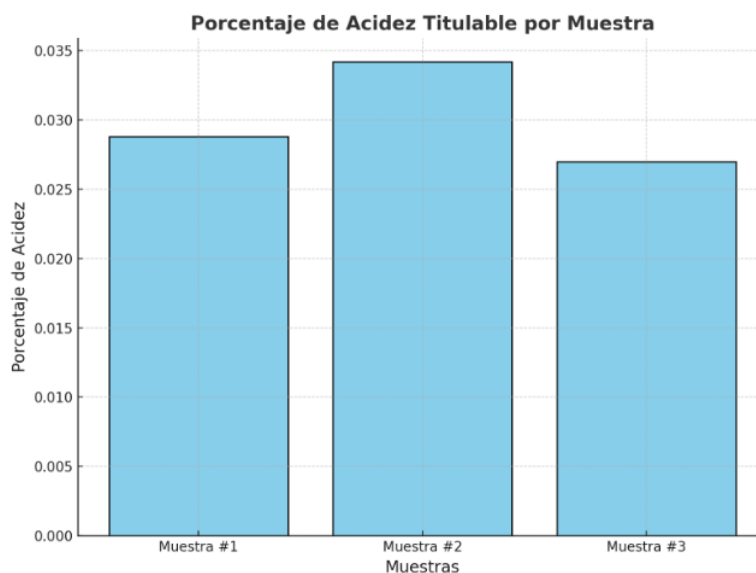
N = Normalidad del titulante (por ejemplo, NaOH).

F = Factor de equivalencia del ácido, que depende del ácido predominante (0.09 para ácido láctico).

M = Masa o volumen de la muestra

Seguidamente se muestra una grafica de barras con los valores de la tabla, mostrando una comparación de variación del porcentaje de acidez(Figura 7.2)

Figura 7.2. Grafica de comparación de los valores obtenidos de las muestras



Variación en el porcentaje de acidez:

- La muestra con el mayor porcentaje de acidez fue la *Muestra #2* con un 0.0342%.
- La *Muestra #3* presentó el menor porcentaje, alcanzando solo un 0.027%.
- La *Muestra #1* tuvo un valor intermedio de 0.0288%.

Estabilidad de la acidez:

La diferencia entre la muestra con mayor y menor acidez es de solo 0.0072%, lo que indica una relativa estabilidad entre las muestras.

Impacto potencial en la síntesis de PLA:

Un mayor porcentaje de acidez puede estar relacionado con una mayor presencia de ácido láctico, el cual es clave en la síntesis de PLA. La muestra con mayor acidez podría tener un rendimiento superior en la obtención del biopolímero.

7.2) pH

A continuación, se muestran los valores del PH en la primera etapa después del proceso de fermentación e incubación.

En la segunda columna se muestra el PH de inicio que fue antes de agregarle el hidróxido de sodio (NaOH) y el PH final fue después de agregarle dicha solución, se monitoreo las muestras por dos días hasta obtener un estado optimo entre 5 y 6

Estos resultados indican un pH óptimo para la formación de acido láctico (Tabla 7.2)

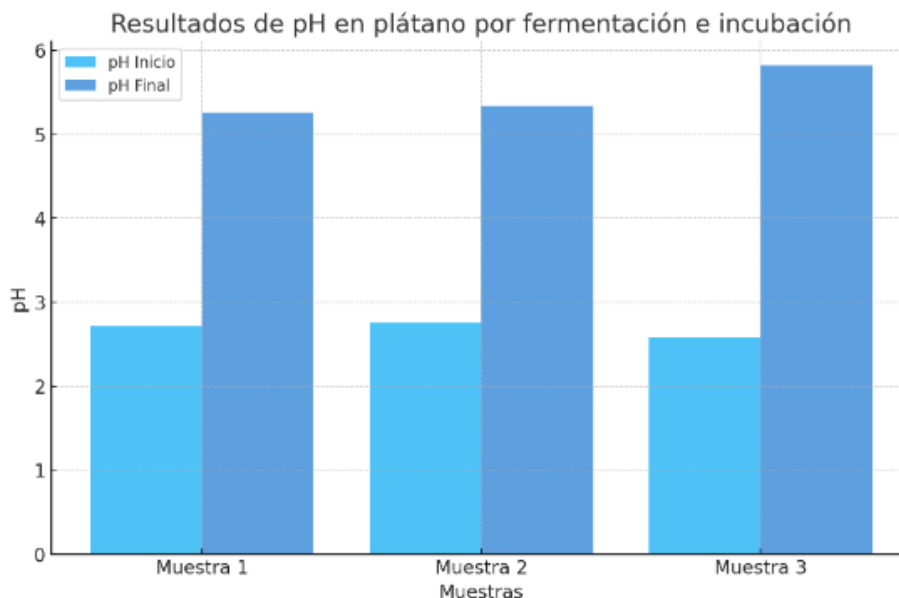
Tabla 7.2. Resultados de pH en plátano por fermentación e incubación

Resultados de pH en plátano por fermentación e incubación			
	PH inicio	PH final	Días de monitoreo
Muestra 1	2.71	5.26	2
Muestra 2	2.75	5.34	2
Muestra 3	2.58	5.82	2

El proceso de fermentación e incubación tuvo una ventaja al ser un ambiente menos ácido, lo cual es característico de este tipo de procesos biológicos, donde los microorganismos responsables de la fermentación consumen compuestos ácidos, aumentando así el pH.

- **Tendencia consistente entre fases:** En todas las muestras, el mayor incremento en pH ocurrió durante la fase inicial de la fermentación e incubación, mientras que el cambio en pH posterior fue más pequeño, pero aún significativo en la segunda medición (fase de incubación). Esto podría reflejar una estabilización del proceso de fermentación o la acción de otros factores como la temperatura, el tiempo de incubación o la presencia de nutrientes específicos. (Figura 7.3)

Figura 7.3. Resultado del ph fase inicial y final



-
- **Importancia de la medición del pH:** El pH es un parámetro clave en el monitoreo de procesos de fermentación, ya que puede influir en la actividad de los microorganismos involucrados, la calidad del producto final, y la seguridad microbiológica del proceso. En este caso, el aumento en pH puede indicar una correcta evolución del proceso, aunque es importante seguir observando si se alcanza un pH óptimo para los objetivos específicos de esta investigación.

7.3) Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

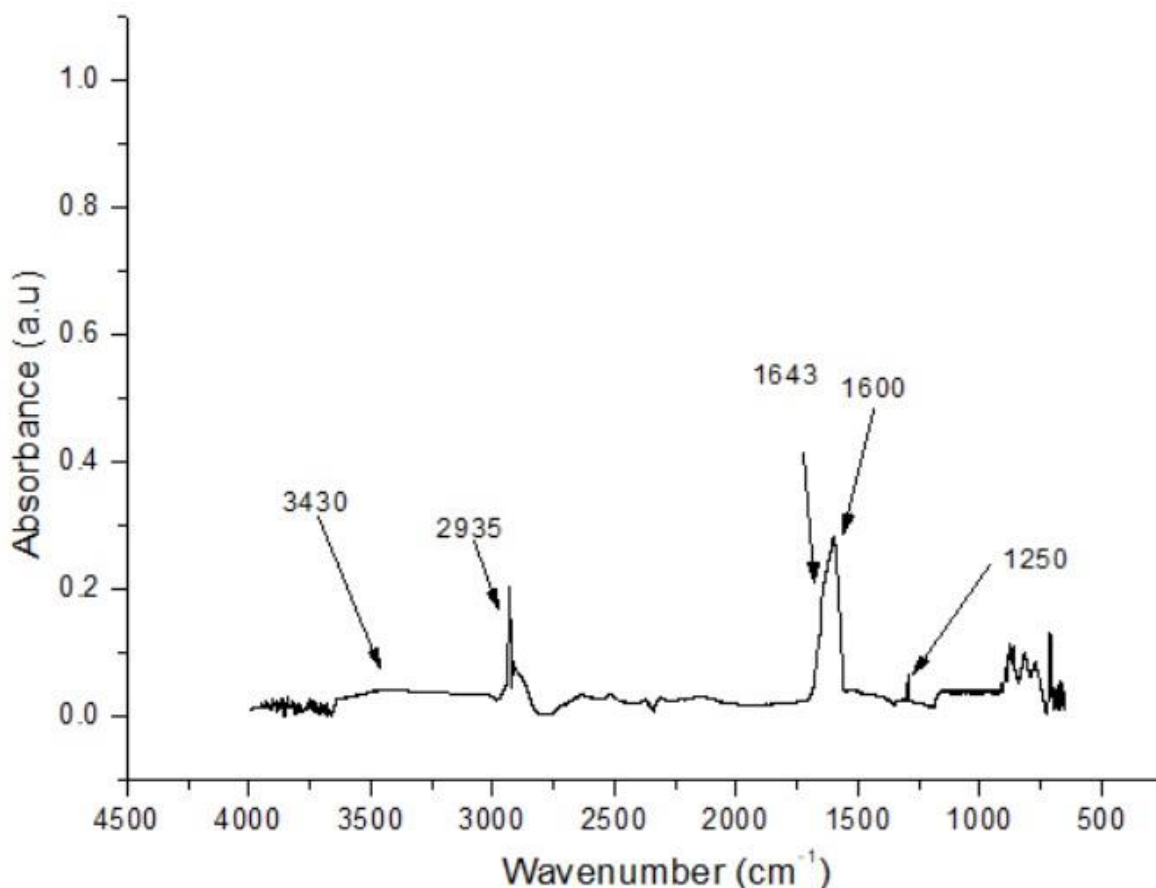


Figura 7.4 Espectroscopia de Infrarrojo con el ácido láctico

Del proceso de extracción del ácido láctico, se tomó una gota que se aplicó a una pastilla de KBr para poder realizar la caracterización mediante FTIR (Figura 7.4). En el espectro se puede observar el pico a 3430 cm⁻¹, el cual pudiera ser atribuido a la tensión del enlace -OH. La banda a 1643 cm⁻¹ puede ser atribuida al enlace -C = O. La vibración de tensión asimétrica del enlace - COO en 1600 cm⁻¹; también se puede observar la tensión de los enlaces -C-H y - CH₃ presentes en la molécula en el número de onda en 2935 cm⁻¹. En el pico a 1250 cm⁻¹ así como la deformación de los enlaces - OH.

CAPITULO VIII. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos de las mediciones de pH en las muestras de plátano durante el proceso de fermentación e incubación muestran un comportamiento característico y positivo para el control del pH. En todos los casos, el pH inicial era ácido, con valores entre 2.58 y 2.71, y aumentó considerablemente hasta alcanzar un rango entre 5.26 y 5.82 tras dos días de monitoreo. Esto refleja un proceso exitoso de fermentación que disminuye la acidez, estabilizando el pH en un rango más moderado.

La espectroscopia de infrarrojo dio resultados positivos a un análisis de viabilidad encontrada de ácido láctico de acuerdo a su lectura.

Como punto final esta investigación y análisis muestran que es viable la obtención de síntesis de ácido láctico para conversión en PLA y también como un posible apósito si se realizan mas pruebas a las que se tienen.

CAPITULO IX. RECOMENDACIONES

Los resultados demuestran que el proceso de fermentación e incubación está favoreciendo la estabilización del pH dentro del rango de **5 a 6**, lo que es adecuado tanto para la producción de PLA como para aplicaciones cosméticas en la piel. Un pH dentro de este rango es generalmente considerado seguro y óptimo para la interacción con la piel, ya que se alinea con el pH natural de la epidermis, que varía entre 4.5 y 5.5. Esto puede reducir la posibilidad de irritaciones y asegurar una mayor compatibilidad en aplicaciones dermatológicas.

Optimización del proceso: Si se busca un pH aún más específico (por ejemplo, un pH de 5.5 exacto para maximizar la compatibilidad con la piel), se podría optimizar el proceso de fermentación controlando factores como la temperatura, la cantidad de microorganismos y los nutrientes disponibles durante la incubación.

Dado que las aplicaciones en la piel requieren productos con propiedades seguras y no irritantes, se recomienda realizar pruebas dermatológicas de irritación o sensibilización con las muestras de plátano después de la fermentación. Esto confirmará que el pH controlado entre 5 y 6 no cause reacciones adversas en la piel y pueda ser aprovechado en productos como cremas o geles.

Como recomendación final, se tienen que analizar más procesos para futuras aplicaciones.

REFERENCIAS

- Rujnić-Sokele, M., & Pilipović, A. (2020). Advances in PLA production and applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01452-0>
- Rath, S., Ghosh, P., & Sahoo, S. (2020). Sustainable PLA production from alternative sources: A review of methods and applications. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109250. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109250>
- Deka, R., Sharma, R., & Bhattacharyya, S. (2022). Advances in the synthesis of PLA from renewable resources and its applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 1283-1294. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.033>
- Ahmed, S., Mehmood, S., & Khan, T. (2020). Banana peel as a sustainable source of cellulose for biodegradable plastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(23), 48785. <https://doi.org/10.1002/app.48785>
- Mehmood, S., Zhang, L., & Akhtar, M. (2020). The potential of banana peel-derived cellulose for PLA synthesis and medical applications. *Biomaterials Science*, 8(3), 661-673. <https://doi.org/10.1039/d0bm01836a>
- Martínez, R., Gómez, P., & Silva, C. (2021). Biodegradability and biocompatibility of PLA produced from agricultural waste. *Biotechnology Advances*, 39, 107485. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107485>
- Zhao, Y., Zhang, Y., & Xu, W. (2021). The use of banana peel as a renewable resource for the synthesis of PLA: A comparative study with traditional feedstocks. *Renewable Energy*, 166, 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.052>
- Patel, H., Singh, A., & Sharma, D. (2021). Environmental impact and economic viability of PLA produced from agricultural residues. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124755>
- Yuan, S., Li, P., & Zhang, F. (2022). Recent advances in biopolymer-based materials for wound dressing applications: PLA and its derivatives. *Materials Science and Engineering: C*, 126, 112053. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112053>

Orozco Olivarez, F. (2011). *Producción de ácido láctico por medio de fermentación anaerobia y su aplicación en la síntesis de poli (ácido láctico)*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Recuperado de Repositorio CICY

Gómez, S. (2014). *Síntesis y caracterización de ácido poli L-láctico de bajo peso molecular*. Universidad del Valle. Recuperado de Repositorio Univalle

Lema Guamán, J. (2023). *Obtención de ácido láctico a partir del lactosuero por medio de fermentación con Lactobacillus delbrueckii*. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de Repositorio UPS

Sudesh, K., & Iwata, T. (2020). Sustainable bioplastics: recent progress in the production and properties of polyhydroxyalkanoates. *Advanced Science*, 7(10), 2000183.

Mikula, K., Izydorczyk, G., & Skrzypczak, D. (2021). Biopolymers—An alternative for conventional plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29), 39063-39081.

Sharma, S., Dutta, S., Mohapatra, S., & Mohanty, S. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) based sustainable biocomposites: Recent development and applications in 3D printing. *Journal of Polymer Research*, 28(8), 1-27.

Gopi, S., Balakrishnan, P., & George, S. C. (2020). Biopolymers and their composites for drug delivery: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 682-704.

Li, S., Shi, X., Xu, L., & Yang, X. (2021). Protein-based biopolymers for biomedical and pharmaceutical applications. *Polymers*, 13(2), 183.

Halim, R., Yusoff, M. M., & Anuar, F. H. (2022). Advances in microbial polyhydroxyalkanoates for medical and therapeutic applications. *Journal of Biotechnology*, 343, 59-73.

Bátori, V., Åkesson, D., Zamani, A., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2020). Anaerobic degradation of bioplastics: A review. *Waste Management*, 113, 487-498.

- Ishak, M. I., Nordin, A., Hamid, S. A., & Ariffin, H. (2021). Biopolymers for advanced applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(1), 75-91.
- Cazón, P., & Vázquez, M. (2021). Applications of biopolymers in food packaging. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105229.
- Yao, J., Fang, M., Guo, P., & Liu, X. (2021). Cellulose-based biopolymers: A review of structure, functional properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117385.
- Radzi, A. M., Halim, N. H. A., & Abdullah, S. (2020). Development and applications of starch-based biopolymer films: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(13), 1414-1430.
- Martínez-Camacho, A. P., et al. (2021). Recent advances in chitosan-based hydrogels: Properties, modification strategies, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117587.
- Madhavan Nampoothiri, K., Nair, N. R., & John, R. P. (2022). Green and sustainable pathways for polylactic acid production. *Progress in Polymer Science*, 122, 101470.
- Kopinke, F. D., Mackenzie, K., & Wachsen, O. (2020). Polylactide (PLA) and its composites: On the road to functional bioplastics. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 22, 100325.
- Dusselier, M., & Sels, B. F. (2020). “Green” catalysts for sustainable bioplastics. *Chemical Society Reviews*, 49(10), 3304-3362.
- Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E. (2021). Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 75, 18-54.
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2021). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392.

Yuan, S., Li, X., Fan, J., & Hu, Y. (2020). Stereocomplex polylactide: Synthesis, properties, and biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(25), 48744.

Jiang, L., Moretti, A., & Desroches, M. (2021). High molecular weight polylactide and applications. *Journal of Polymer Science*, 59(1), 25-39.

Xie, F., Zhang, X., & Zhao, X. (2022). Recent advances in silk fibroin-based scaffolds for tissue engineering. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 8(1), 19-36.

Garlotta, D., Elidrissi, I., & Wambua, P. M. (2020). Plasticization of PLA using vegetable oils: Effects on mechanical and thermal properties. *Polymer Testing*, 90, 106692.

Wu, Y., Li, Y., & Bao, H. (2021). Cross-linking and modification of PLA for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(19), 50454.

Arrieta, M. P., López, J., Hernández, A., Rayón, E., & Tovar, R. (2020). Recent advances in polylactic acid materials for sustainable food packaging. *Polymers*, 12(12), 2933.

Salazar, H., Dufresne, A., & D'Amico, S. (2022). Advances in PLA-based materials for packaging applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 3409-3432.

Vázquez-García, E., Sánchez-Moreno, F., & Ruiz-Pérez, M. (2022). Producción de ácido poliláctico a partir de maíz en el estado de Jalisco. *Tesis de Doctorado, Universidad de Guadalajara*.

Ramírez-Carmona, M., González-Sánchez, L., & Pérez-Gutiérrez, E. (2021). Evaluación de la caña de azúcar como materia prima para la producción de biopolímeros en México. *Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional*.

Serrano-Ruiz, C., Martínez-Soto, G., & Aguirre-Rivera, J. R. (2020). Aprovechamiento de residuos agrícolas para la producción de PLA en México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 35(1), 90-110.

González-Ortega, A., Ramírez-Carmona, M., & López-Sánchez, J. (2021). Métodos de síntesis del ácido poliláctico: Avances y desafíos. *Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México*.

Martínez-Flores, I., & Hernández-Cárdenas, J. (2020). Polimerización por apertura de anillo para la obtención de PLA de alto peso molecular. *Revista Latinoamericana de Polímeros*, 28(3), 305-320.

López-Esquivel, M., & Sánchez-Ruiz, F. (2021). Polimerización por intercambio éster-éster de PLA para aplicaciones biomédicas. *Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional*.

Ramírez-Rodríguez, J., & Ortiz-Miranda, R. (2022). Modificación de propiedades del ácido poliláctico mediante polimerización por intercambio éster-éster. *Revista de Ingeniería y Materiales Sustentables*, 12(1), 85-97.

Hernández-Muñoz, P., & Pérez-Jiménez, L. (2021). Catalizadores biológicos para la síntesis de PLA: Un enfoque sostenible. *Revista Mexicana de Biotecnología*, 15(2), 99-110.

Pérez-Jiménez, C., & Torres-García, M. (2021). Síntesis de PLA en medios acuosos: Nuevas perspectivas. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana*.

Hernández-Ramírez, M., & Martínez-Méndez, A. (2021). Operación de biorreactores en la producción de ácido láctico: Implicaciones para la síntesis de PLA. *Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México*.

Ramírez-Salazar, M., & Gutiérrez-Ruiz, P. (2022). Reactores de polimerización para la síntesis de PLA: Una revisión técnica. *Revista de Ingeniería Química y Materiales*, 28(1), 67-80.

Pérez-Gómez, L., & Vázquez-Martínez, E. (2020). Procesos de extrusión en la fabricación de biopolímeros: Aplicaciones del PLA. *Revista Mexicana de Ingeniería y Tecnología*, 15(3), 221-235.

López-Jiménez, C., & Torres-Vega, R. (2021). Técnicas de caracterización del ácido poliláctico: Un enfoque integral. *Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional*.

Ramírez-López, R., & García-Cabrera, D. (2021). Modificación química del PLA y su caracterización por IR: Un enfoque hacia aplicaciones biomédicas. Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional.

Pérez-González, A., & Martínez-López, M. (2020). Caracterización de mezclas de PLA con biopolímeros mediante espectroscopía infrarroja. *Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*.

López-Morales, E., & Sánchez-Ramírez, J. (2021). Estudio de la cristalinidad y degradación del ácido poliláctico mediante espectroscopía IR. *Revista de Polímeros Sustentables*, 18(4), 211-225.

Gómez-Ruiz, C., & Hernández-Sánchez, J. (2021). Impacto ambiental del PLA: Biodegradabilidad y ciclo de vida. *Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León*.

Martínez-García, P., & López-Carrillo, A. (2022). Modificación de las propiedades mecánicas del PLA para aplicaciones industriales. *Tesis de Doctorado, Universidad de Guadalajara*.

Ramírez-González, L., & Pérez-López, V. (2020). Innovaciones en la síntesis y modificación del PLA para aplicaciones biomédicas. *Revista de Ciencia y Tecnología de Polímeros*, 16(3), 89-101.

Hernández-Moreno, L., & Pérez-Ávila, M. (2021). Evaluación del PLA en envases alimentarios biodegradables. *Revista Mexicana de Ingeniería de Alimentos*, 12(2), 113-125.

García-Ramos, F., & Flores-Sánchez, M. (2022). Aplicaciones del ácido poliláctico en dispositivos médicos y suturas. *Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional*.

López-Hernández, A., & García-Martínez, R. (2020). Uso del PLA en la impresión 3D: Ventajas y limitaciones. *Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México*.

Pérez-Gómez, J., & Ramírez-Salazar, S. (2021). Aplicaciones agrícolas del PLA: Un enfoque hacia la sostenibilidad. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo*.

Gómez-Álvarez, L., & Jiménez-Pérez, A. (2021). Análisis de la biodegradabilidad del PLA en envases alimentarios. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León*.

López-García, R., & Ramírez-Moreno, V. (2022). Mejoras en las propiedades de barrera del PLA mediante aditivos y nanocompuestos. *Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional*.

Pérez-González, A., & Morales-Gutiérrez, J. (2021). Evaluación del uso de PLA en envases rígidos para alimentos. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo*.

López-Morales, E., & Sánchez-Rodríguez, P. (2021). Uso de películas de PLA en el embalaje de alimentos frescos: Un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Alimentaria*, 13(3), 203-217.

Ramírez-Ávila, S., & Hernández-López, G. (2022). Bolsas biodegradables de PLA: Desempeño y perspectivas en el embalaje de alimentos. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León*.

Martínez-Rodríguez, P., & García-Pérez, S. (2021). Optimización de la producción de PLA para embalaje de alimentos. *Tesis de Doctorado, Universidad de Guadalajara*.

Hernández-Moreno, L., & Sánchez-Gómez, M. (2020). Nanocompuestos de PLA para aplicaciones avanzadas en embalaje de alimentos. *Revista Mexicana de Ciencia y Tecnología de Polímeros*, 17(2), 94-108.

Jiménez, R. (2020). Impacto socioeconómico y ambiental del cultivo de plátano en el trópico latinoamericano. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Sánchez, M. (2021). Aprovechamiento del almidón de plátano para la síntesis de bioplásticos: Un enfoque hacia la sostenibilidad. Universidad de Costa Rica.

González, A. (2021). Valor nutricional y usos del plátano en la alimentación latinoamericana. Universidad de Veracruz.

Martínez, C. (2020). Producción y uso de harina de plátano en la industria alimentaria. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Fernández, J. (2022). Aprovechamiento de la cáscara de plátano para la producción de bioplásticos: Un enfoque hacia la sostenibilidad. Universidad de Guadalajara.

Pérez, L. (2021). Usos tradicionales y propiedades medicinales del plátano en la cultura mexicana. Universidad de Oaxaca.

González, A. (2021). Impacto del cultivo de plátano en la economía rural de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche.

Ramírez, M. (2022). Prácticas agroecológicas en el cultivo del plátano en Campeche: un enfoque sostenible. Universidad de Guadalajara.

García, E. (2021). Impacto ambiental de los desechos agrícolas en la producción de plátano en México. Universidad de Puebla.

López, J. (2022). Aprovechamiento de cáscaras de plátano para la producción de bioplásticos: una alternativa sostenible. Universidad de Quintana Roo.

Ramírez, F. (2023). Compostaje de residuos de plátano: un enfoque para la sostenibilidad agrícola. Universidad de Campeche.



Figura 6.2. Clasificación y selección de las cascaras



Figura 6.6. Trituración de las cascaras



Figura 6.7. Tratamientos con ácido sulfúrico



Figura 6.8. Filtrado y Almacenamiento



Figura 6.12. Incubación de las muestras



Figura 6.14. Monitoreo del PH

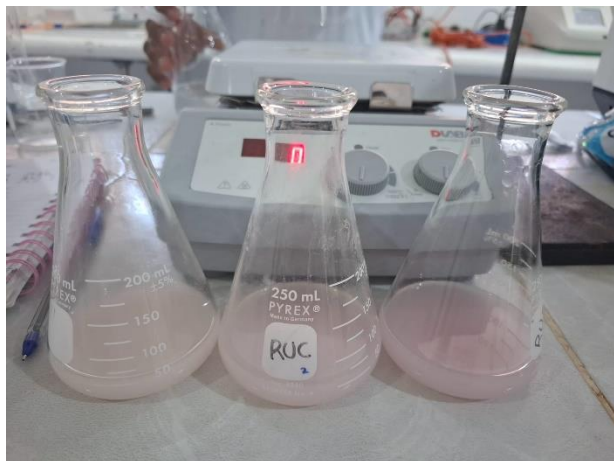


Figura 6.15. Titulación de Acidez

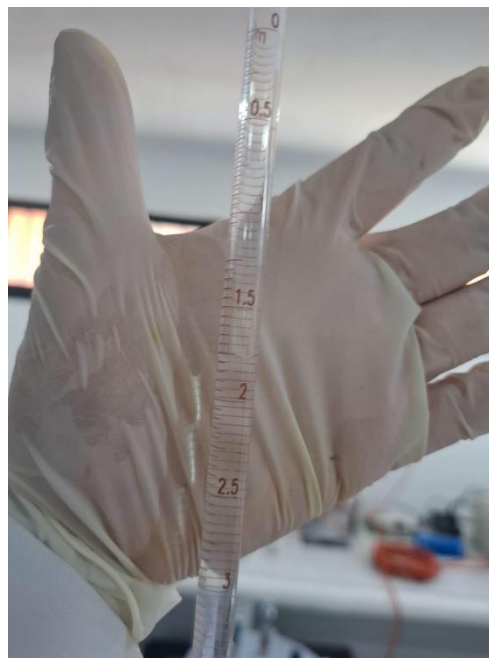


Figura 6.16. Cálculos y análisis