

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



**“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y
ANTIMICROBIANAS DE BIOPELÍCULAS ELABORADAS CON ALMIDÓN DE
JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus*) ADICIONADAS CON NANOPARTÍCULAS DE
HIDRÓXIDO DE CALCIO”**

Por:

ESTELA SELINA SILVA SILVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México.

Junio, 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS
Y ANTIMICROBIANAS DE BIOPELÍCULAS ELABORADAS CON
ALMIDÓN DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus*) ADICIONADAS CON
NANOPARTÍCULAS DE HIDRÓXIDO DE CALCIO"**

Por:

ESTELA SELINA SILVA SILVA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Aprobada por el comité de Asesoría:



Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez

Director interno



Dr. Tomás Tovar Benitez

Director externo

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y
ANTIMICROBIAAS DE BIOPELICULAS ELABORADAS CON ALMIDÓN DE JÍCAMA
(*Pachyrhizus erosus*) ADICIONADAS CON NANOPARTÍCULAS DE HIDRÓXIDO DE
CALCIO**

Presentada por

ESTELA SELINA SILVA SILVA

T E S I S

**Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito para
obtener el título de:**

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Aprobada por:

Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez

Director

Dra. Sarahí del Carmen Rangel Ortega

Co Asesora

Dra. Lluvia de Abril Alexandra Soriano Melgar

Co Asesora

Dr. Francisco Hernández Centeno

Co Asesor

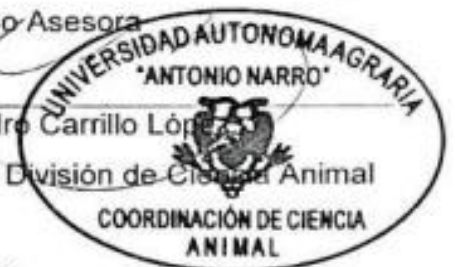
MC Pedro Carrillo López

Coordinador de la División de Ciencia Animal

COORDINACIÓN DE CIENCIA
ANIMAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.



DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Yo Estela Selina Silva Silva bajo este documento oficial declaro que no se realizaron acciones que pueden señalarse como plagio, respetando las citaciones de los autores originales para reproducir material en este documento; por lo cual me responsabilizo de las consecuencias que conlleva el plagio, declarando que este documento es de mi auditoría.

AGRADECIMIENTOS

Expreso el más profundo agradecimiento a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi alma mater, por brindarme una formación académica sólida y por proporcionarme la oportunidad de vivir experiencias enriquecedoras que han moldeado mi trayectoria profesional y personal.

A la **Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez**, por su invaluable guía, orientación, apoyo y por brindarme las condiciones necesarias para la realización de este proyecto de investigación.

Al **Dr. Tomás Tovar Benítez**, a la **Dra. Josefina Porras Saavedra** y la **M. C. Nalleli Concepción Pérez Pérez**, del Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo, por su valiosa contribución de conocimientos y experiencias que fueron fundamentales para el diseño metodológico y el análisis de los datos de este estudio.

Al **Dr. Eduardo Palacios González**, del Instituto Mexicano del Petróleo, por su colaboración en la obtención de las micrografías mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis de composición elemental mediante espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) de las biopelículas.

A la **Dra. Dra. Sarahí del Carmen Rangel Ortega**, por su asesoría en la interpretación de resultados los antimicrobianos.

A la **M. C. Alma Leticia Martínez Herrera**, por su eficiente colaboración y asistencia técnica.

A mi padre, **Laurencio Silva Ortiz** y a mis hermanos; **Eleazar, Francisco y Carlos** por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, especialmente en los momentos más desafiantes.

A **Carlos Daniel López López** por todo su apoyo, palabras de motivación y buenos momentos compartidos.

DEDICATORIA

"A Dios, cuya gracia ha sido mi compañero inseparable en este viaje de aprendizajes y descubrimientos. Así mismo, en memoria de Elodia Acela Silva Silva, mi madre, este logro es un abrazo eterno para ella que siempre creyó en mí, me apoyó y me impulsó a alcanzar mis sueños. Sus palabras aún resuenan en mi corazón y me motivan a seguir adelante".

ÍNDICE

ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
Introducción	3
1.1 Justificación.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Hipótesis.....	6
CAPITULO II.....	7
Revisión de literatura	7
2.1 Biopelículas.....	7
2.1.1 Componentes	8
2.1.2 Métodos para la elaboración de biopelículas.....	12
2.1.3 Propiedades fisicoquímicas de las biopelículas.....	13
2.2 Jícama	23
2.2.1 Producción en México.....	23
2.2.2 Jícama de descarte	24
2.2.3 Composición proximal y química	24
2.3 Almidón.....	27
2.3.1 Gelatinización	28
2.3.2 Tipos de almidón	29

2.3.3 Almidón de jícama	29
2.4 Hidróxido de calcio	30
2.5 Nanopartículas	31
2.6 Nanopartículas de hidróxido de calcio	31
METODOLOGÍA	33
3.1 Materiales, equipos y reactivos	33
3.1.1 Materiales	33
3.1.2 Equipos.....	34
3.1.3 Reactivos	35
3.2 Materia prima.....	35
3.3 Obtención del almidón de jícama	36
3.3.1 Extracción	36
3.3.2 Purificación	37
<u>3.3.3</u> Contenido de amilosa del almidón de jícama	39
3.4 Elaboración de las biopelículas	41
3.5 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas	43
3.5.1 Evaluación cualitativa	43
3.5.2 Humedad	43
3.5.3 Solubilidad en agua	44
3.5.4 Color	46
3.5.5 Opacidad	47
3.5.6 Espesor.....	48
3.5.7 Ensayo de tensión	49
3.5.8 Permeabilidad al vapor de agua	50
3.6 SEM y EDX.....	52

3.7 Evaluación de propiedades antimicrobianas	53
3.8 Análisis estadístico.....	54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
ANEXO 1 Análisis estadísticos	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido proximal de la jícama	24
Tabla 2. Contenido de carbohidratos de la jícama	25
Tabla 3. Contenido de minerales de la jícama	25
Tabla 4. Contenido de aminoácidos de la jícama.....	26
Tabla 5. Contenido de vitaminas de la jícama.....	26
Tabla 6. Composición química proximal del almidón de jícama	30
Tabla 7. Evaluación cualitativa del diseño de mezclas.....	55
Tabla 8. Resultados de las propiedades mecánicas del diseño de mezclas	57
Tabla 9. Evaluación cualitativa de las biopelículas.....	59
Tabla 10. Resultados de humedad, solubilidad y espesor	60
Tabla 11. Resultados de color y opacidad.....	63
Tabla 12. Resultados de ensayo de tensión.....	65
Tabla 13. WVP películas nanocompuestos	69
Tabla 14. Contenido de amilosa almidón de jícama, maíz y yuca.	70
Tabla 15. Resultados EDX	75
Tabla 16. Resultados del efecto antimicrobiano	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espacio de color CIELAB	15
Figura 2. Estructura química de la amilosa	27
Figura 3. <i>Estructura química de la amilopectina</i>	28
Figura 4. <i>Etapas de la fase experimental</i>	33
Figura 5. <i>Jícama, almidón de jícama, nanopartículas de hidróxido de calcio</i>	36
Figura 6. <i>Extracción del almidón de jícama</i>	37
Figura 7. <i>Jícama, molienda húmeda, almidón nativo</i>	37
Figura 8. <i>Purificación del almidón de jícama</i>	38
Figura 9. <i>Lavado con NaOH, lavado con HCl, almidón de jícama purificado</i>	39
Figura 10. <i>Determinación del contenido de amilosa del almidón de jícama</i>	40
Figura 11. <i>Reacción con yodo, lectura en espectrofotómetro</i>	40
Figura 12. <i>Elaboración de las BP</i>	42
Figura 13. <i>Almidón pregelatinizado, Ca(OH)₂-NP disperso , secado de BP</i>	43
Figura 14. <i>Determinación de humedad</i>	44
Figura 15. <i>Secado de muestras húmedas, Pesado de muestras secas</i>	44
Figura 16. <i>Determinación de solubilidad en agua</i>	45
Figura 17. <i>BP sumergida, BP incubadas, pesado de BP solubilizadas</i>	46
Figura 18. <i>Evaluación del color de las BP</i>	47
Figura 19. <i>Lecturas de color de las BP</i>	47
Figura 20. <i>Determinación de la opacidad</i>	48
Figura 21. <i>BP colocadas en celdas, lectura de absorbancia</i>	48
Figura 22. <i>Lectura del espesor de las BP</i>	49
Figura 23. <i>Ensayo de tensión</i>	50
Figura 24. <i>Muestras de BP en NaBr, Ensayo de tensión en texturómetro</i>	50
Figura 25. <i>Determinación de permeabilidad al vapor de agua</i>	51
Figura 26. <i>Celdas de permeabilidad, Cámara climática, Pesado</i>	52
Figura 27. <i>Recubrimiento de las BP con oro, Obtención de las micrografías</i>	53
Figura 28. <i>Preparación del inóculo, Inoculación, Muestras incubadas</i>	54
Figura 29. <i>BP adicionadas con Ca(OH)₂-NP</i>	59
Figura 30. <i>Color de las BP</i>	64

Figura 31. <i>Comparación de propiedades mecánicas con otros almidones</i>	67
Figura 32. <i>Resultados de WVP</i>	68
Figura 33. <i>Micrografías</i>	73
Figura 34 <i>Espectro EDX</i>	75

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de las nanopartículas de hidróxido de calcio ($\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$) sobre las propiedades fisicoquímicas y antimicrobianas de biopelículas (BP) desarrolladas a partir de almidón de jícama. Inicialmente, se extrajo y purificó el almidón. Posteriormente, se elaboraron BP mediante el método de vaciado en placa ("Casting"), aplicando un diseño de mezclas que incluyó 13 formulaciones con distintas proporciones de almidón de jícama y glicerol. A partir esta etapa, se determinó la formulación óptima (4.4142% p/v almidón y 1.3550% glicerol), la cual destacó por su manejabilidad, continuidad, homogeneidad, así como por su flexibilidad superior y notable resistencia a la tensión. Con la formulación óptima establecida, se aplicó un diseño experimental completamente al azar, incorporando $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ en concentraciones de 50, 100 y 150 ppm a las BP. Y se evaluaron los siguientes parámetros: humedad (%), solubilidad (%), color (L^* , a^* , b^*), opacidad (mm - 1), espesor (mm), propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión (MPa), elongación al rompimiento (%) y módulo de Young (MPa), y permeabilidad al vapor de agua (g/s·m Pa). Además se obtuvieron micrografías de la superficie mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) y la composición elemental (% peso y % atómico) a través del análisis de energía dispersiva de rayos X (EDX). El efecto antimicrobiano de las BP se evaluó mediante el método de difusión en agar, cuantificando el diámetro de los halos de inhibición (mm) frente a tres cepas bacterianas específicas: *Escherichia coli*, *Salmonella thyphimurium* y *Listeria monocitogenes*. Los resultados obtenidos mostraron que la incorporación de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ influyó significativamente ($p \leq 0.05$) en la mayoría de las propiedades de las BP. En cuanto a las propiedades de interacción con el agua, se observó un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en el contenido de humedad, alcanzando 30.12% en el tratamiento con 150 ppm de NP (frente a 17.59% en el testigo). De manera inversa, la solubilidad disminuyó significativamente ($p < 0.05$) hasta 22.89% en el tratamiento con 150 ppm (frente a 74.21% en el testigo). La permeabilidad al vapor de agua (WVP), pese a no presentar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los cuatro tratamientos, mostró una ligera disminución en el tratamiento con 150 ppm ($2.34\text{E-}10$ g/(s·m·Pa)), sugiriendo un efecto más consistente a concentraciones aún más elevadas. Respecto a las propiedades ópticas y estructurales,

la opacidad aumentó significativamente ($p < 0.05$) hasta 0.46 mm^{-1} en el tratamiento con 150 ppm (frente a 0.34 mm^{-1} en el testigo). Por otro lado, el espesor no presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos. En relación al color, aunque los parámetros L^* , a^* y b^* mostraron variaciones (indicando tonalidades blancas, rojizas y azules, respectivamente), el valor de ΔE reveló que estas diferencias cromáticas fueron prácticamente imperceptibles al ojo humano. Las propiedades mecánicas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), principalmente en el tratamiento con 150 ppm de NP en comparación con el testigo. Para este tratamiento, se registraron valores de 1.74 MPa para la resistencia a la tensión, 21.96% para la elongación al rompimiento y 10.2 MPa para el módulo de Young. Estos resultados indican que las BP de almidón de jícama con $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ exhibieron una combinación de propiedades mecánicas relevantes para aplicaciones que requieran durabilidad, protección y soporte estructural. Por su parte, el análisis elemental por EDX confirmó la incorporación efectiva de las $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ en las BP, con un contenido de calcio que aumentó en función de la concentración. El calcio, elemento aportado exclusivamente por las NP, se detectó en los tratamientos de 50, 100 y 150 ppm, siendo el de 150 ppm significativamente diferente ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos y alcanzando valores de hasta 6.54% en peso y 2.19% en porcentaje atómico. Estos hallazgos validaron la presencia y la carga de NP en la superficie de las BP y fueron coherentes con las modificaciones morfológicas observadas mediante microscopía SEM. Las micrografías exhibieron una superficie notablemente más lisa y homogénea en el tratamiento con 150 ppm en comparación con el testigo y con los tratamientos de 0, 50 y 100 ppm; sin embargo, es importante señalar que a esta alta concentración se presentó aglomeración a nivel nano. Finalmente, el análisis antimicrobiano demostró que las BP con $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ tienen un efecto bacteriostático. En el tratamiento con 150 ppm, se observaron halos de inhibición superiores de 2.78 mm para *Escherichia coli*, 1.89 mm para *Salmonella typhimurium* y 1.78 mm para *Listeria monocytogenes*. En conclusión, estos resultados validan el potencial de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ como materiales con características funcionales importantes para su consideración en el desarrollo de empaques activos, contribuyendo a la protección y seguridad de alimentos.

Palabras clave: *almidón de jícama, biopelículas, nanopartículas de hidróxido de calcio.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria constituye uno de los principales sectores consumidores de empaques fabricados a partir de polímeros sintéticos, los cuales desempeñan un papel fundamental en la protección, distribución y comercialización de los alimentos. Sin embargo, existe una creciente preocupación en torno a los impactos adversos asociados a estos materiales; incluyendo: la contaminación ambiental, los problemas de salud pública y la calidad de los productos.

Debido a ello, la búsqueda de soluciones sostenibles en la industria alimentaria ha impulsado el desarrollo y la aplicación de biopelículas como una alternativa prometedora a los plásticos convencionales. Las biopelículas son capas delgadas elaboradas de forma independiente, que se utilizan para recubrir o colocarse entre los componentes de un producto. Su función principal es proteger a los alimentos de daños mecánicos, y de alteraciones físicas, químicas y microbiológicas. Se elaboran a partir de biopolímeros extraídos directamente de la biomasa como: polisacáridos, proteínas, lípidos y compuestos activos o bien de biopolímeros producidos por microorganismos y síntesis química.

Uno de los biopolímeros más estudiados y utilizados para la elaboración de biopelículas es el almidón, debido a su alta disponibilidad, carácter renovable y bajo costo. En los últimos años, se ha estudiado el uso de almidones extraídos de fuentes no convencionales, como la jícama. La producción de jícama puede alcanzar hasta 75 toneladas por hectárea; Sin embargo, cada año se pierde aproximadamente el 25% de la cosecha, debido a un crecimiento anormal, cuarteaduras o coloración diferente en los tubérculos. Estos problemas ocasionan que el producto no cumpla con los estándares de calidad para la comercialización y, como resultado, se descarta, convirtiéndose en un residuo agrícola sin aprovechar. Este subproducto puede tener un valor agregado si se utiliza para la obtención de almidón.

El almidón de jícama presenta un gran potencial para la producción de biopelículas. No obstante, se ha reportado que las biopelículas elaboradas a partir de almidón presentan limitaciones inherentes, como propiedades mecánicas pobres, alta permeabilidad al vapor de agua y tendencia a la retrogradación, lo que afecta su desempeño en aplicaciones funcionales. Para mitigar estas deficiencias, se han implementado diversas alternativas, incluyendo la modificación química y física del almidón, incorporación de plastificantes y aditivos, así como su combinación con otros biopolímeros.

Además, el uso de la nanotecnología, específicamente la inserción de nanomateriales, como las nanopartículas, ha cobrado relevancia en la mejora de las propiedades estructurales y funcionales de las biopelículas. Nuevas investigaciones han demostrado que las nanopartículas refuerzan la matriz polimérica, reducen la permeabilidad y mejoran la estabilidad mecánica. Las nanopartículas pueden ser orgánicas e inorgánicas y presentan estructuras de una, dos o tres dimensiones, con tamaños que generalmente son menores a 100 nm. Entre las más utilizadas se encuentran las nanopartículas de óxido de magnesio, óxido de cobre, óxido de calcio, óxido de zinc, dióxido de titanio, plata, celulosa, almidón, quitosano, entre otros.

Actualmente el uso de nanopartículas de hidróxido de calcio en biopelículas es un tema de investigación en desarrollo, ya que la información que existe al respecto es bastante reducida en comparación con otras nanopartículas. En este contexto la presente investigación presenta la aplicación de nanopartículas de hidróxido de calcio en biopelículas elaboradas con almidón de jícama para evaluar su efecto mediante la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y antimicrobianas.

1.1 Justificación

La producción de alimentos genera una gran cantidad de residuos, incluyendo envases, embalajes y desechos agrícolas, los cuales tienen un impacto significativo en el medio ambiente y en la salud de los consumidores. Los empaques fabricados a partir de polímeros sintéticos, al ser mayoritariamente no biodegradables, persisten en el entorno durante largos periodos, acumulándose en suelos urbanos, ríos y océanos. Su fragmentación incompleta genera micro plásticos que afectan la fauna, ingresan en la cadena alimentaria y representan un riesgo potencial para la salud humana. Además, los desechos agrícolas, cuando no son gestionados adecuadamente, contribuyen a la contaminación del aire y del agua.

En este contexto, la jícama de descarte representa una fuente potencial de aprovechamiento (García *et al.*, 2024). La extracción de su almidón y su uso en la elaboración de biopelículas ofrece una alternativa sostenible para reducir el uso de empaques de plástico sintético y la generación de residuos agrícolas no aprovechados. Sin embargo, se ha documentado que las biopelículas elaboradas a partir de almidón presentan ciertas limitaciones en cuanto a sus propiedades mecánicas y de barrera a la humedad (Enríquez *et al.*, 2012).

Para mejorar estas propiedades, recientemente se ha explorado la aplicación de nanotecnología, en particular la incorporación de nanopartículas en matrices biopoliméricas, con el objetivo de optimizar su desempeño estructural y funcional. Este estudio propone la incorporación de nanopartículas de hidróxido de calcio en matrices de almidón de jícama para mejorar sus propiedades mecánicas y de barrera, y con esto ampliar su rango de aplicaciones. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan al desarrollo de materiales de envasado más sostenibles, reduciendo el impacto ambiental y fomentando una economía circular en la industria de los biopolímeros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de las nanopartículas de hidróxido de calcio en biopelículas elaboradas con almidón de jícama, mediante la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y antimicrobianas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Extraer y purificar almidón de jícama (*Pachyrhizus erosus*).
- Elaborar biopelículas incorporando 0, 50, 100 y 150 ppm de nanopartículas de hidróxido de calcio.
- Valorar cualitativamente la manejabilidad, continuidad y uniformidad de las biopelículas obtenidas.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas mediante la determinación de la humedad, solubilidad, color, opacidad, espesor, permeabilidad al vapor de agua y resistencia a la tensión.
- Caracterizar la microestructura y morfología de las biopelículas mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM); así como su composición química elemental mediante la espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, también abreviada EDX o XEDS).
- Evaluar la actividad antimicrobiana frente a un panel de microorganismos indicadores (*Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* y *Listeria monocytogenes*) mediante pruebas de difusión en agar.

1.3 Hipótesis

La incorporación de nanopartículas de hidróxido de calcio (80-100 nm) en biopelículas a base de almidón de jícama cambiará significativamente las propiedades fisicoquímicas, además se prevé un efecto antimicrobiano, inhibiendo el crecimiento de *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* y *Listeria monocytogenes*, haciéndolas más adecuadas para su uso en productos alimentarios.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biopelículas

En la industria alimentaria las películas se definen como estructuras preformadas (láminas sólidas), obtenidas por moldeo que se utilizan generalmente para envolver un producto alimenticio (Khin *et al.*, 2024; Kong *et al.*, 2024). El término “*biopelículas*” se utiliza para describir a las estructuras compuestas por materiales biológicos o de origen natural (Gomes *et al.*, 2021). Guilbert *et al.* (1995) exponen que las biopelículas (BP) son capas delgadas obtenidas de manera independiente que están compuestas por materiales aptos para el consumo de los seres vivos y que funcionan como barreras para la transferencia de agua, gases y solutos en productos alimenticios, contribuyendo así a la conservación de su calidad y frescura.

Las biopelículas se utilizan como material de empaque y cumplen diversas funciones, entre ellas se destaca que; actúan como una barrera minimizando la pérdida o ganancia de humedad, lo que previene modificaciones en la textura y turgencia de los alimentos. Además, retrasan los cambios químicos que pueden afectar el color, aroma y valor nutricional, ya que limitan el intercambio de gases (oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua) que influyen en la estabilidad química y microbiológica (Guaña *et al.*, 2022; McHugh, 2000; Solano *et al.*, 2018). Salinas *et al.* (2015) explican que la aplicación de películas elaboradas con biomoléculas, también puede funcionar como un microsistema que ayuda a modificar las atmósferas del interior de los productos vegetales, lo que representa una alternativa para la conservación de productos hortofrutícolas frescos.

Kong *et al.* (2024) mencionan que una biopelícula ideal debe cumplir ciertos requisitos entre los que se incluye que sean seguros para el consumo humano, excelentes propiedades de barrera, alta resistencia mecánica, estabilidad microbiológica, proceso de producción sencillo y asequibilidad económica.

2.1.1 Componentes

Generalmente, las biopelículas se componen de tres elementos fundamentales: un biopolímero, un disolvente y un plastificante (Guaña *et al.*, 2022). Para formar la matriz estructural, se utilizan biopolímeros de alta masa molar, como proteínas y polisacáridos. Además, se pueden incluir lípidos, como los fosfolípidos, que contribuyen a la formación de bicapas lipídicas y modulan las propiedades de permeabilidad de la matriz. También es posible emplear una combinación de estos componentes, lo que permite adaptar y mejorar las propiedades funcionales de la matriz, optimizando su desempeño en diversas aplicaciones. A partir de esta base, se pueden incorporar otros componentes que mejoren sus propiedades (Solano *et al.*, 2018).

2.1.1.1 Proteínas

Las proteínas son compuestos formados por la unión de más de cien aminoácidos mediante enlaces peptídicos. Cada uno de los aminoácidos contiene un carbono central (carbono α) unido a un hidrógeno, un grupo carboxilo (COOH), un grupo amino (NH₂) y un grupo R o cadena lateral de aminoácidos única (Nur *et al.*, 2014).

En los últimos años se han estudiado diferentes tipos de proteínas como: la proteína de soja, gluten de trigo, suero láctico y zeína de maíz para elaborar biopelículas (Hassan *et al.*, 2018). Las proteínas son eficientes para la formación de estructuras uniformes, presentan buenas propiedades de barrera al oxígeno, dióxido de carbono y lípidos; especialmente a bajas humedades relativas. Desafortunadamente su comportamiento hidrófilo propicia características deficientes de barrera al vapor de agua (McHugh, 2000). Además carecen de resistencia mecánica; por ello se debe regular el grado de plastificación para obtener resultados favorables (McHugh, 2000; Shah *et al.*, 2024).

2.1.1.2 Polisacáridos

Los polisacáridos son compuestos constituidos por un gran número de monosacáridos unidos mediante enlaces glucosídicos formando largas cadenas (CCH UNAM, 2015). Se encuentran ampliamente disponibles en la naturaleza y no son tóxicos (Erginkaya *et al.*, 2014; Mohamed *et al.*, 2020). A lo largo de los años han sido ampliamente utilizados para la elaboración de biopelículas contribuyendo así a la

reducción de envases plásticos tradicionales en el envasado de alimentos. La pectina, carragenina, alginato, goma xantana y almidón son los más empleados (Espitia *et al.*, 2014; Mohamed *et al.*, 2020).

Las biopelículas a base de polisacáridos crean eficientemente una barrera contra el dióxido de carbono y el oxígeno a través de su estructura, por los enlaces de hidrógeno, pero tienen características hidrófilas que limitan su eficacia como barrera al vapor de agua (Shah *et al.*, 2024). Son incoloros, otorgan buena apariencia, tienen un contenido calórico menor por lo que se pueden aplicar para prolongar la vida útil de frutas, verduras, mariscos o productos cárnicos ya que evitan significativamente la deshidratación, el oscurecimiento de la superficie y la rancidez oxidativa (Hassan *et al.*, 2018).

2.1.1.3 Lípidos

Los lípidos son compuestos que se originan de fuentes naturales como animales y plantas. Los grupos funcionales lipídicos se componen de fosfolípidos, fosfátidos, mono-, di- y tri- glicéridos, terpenos, cerebrósidos, alcohol graso y ácidos grasos (Akoh y Min, 2008; Mohamed *et al.*, 2020). Tienen diferentes características que determinan su eficacia en las películas y recubrimientos; incluida su estructura, estado físico (líquido o sólido), disposición química, hidrofobicidad e interacciones con otros componentes (Devi *et al.*, 2024).

En la actualidad las ceras, ácidos grasos, resinas y lípidos neutros son utilizados para elaborar biopelículas (M. B. Pérez & Jong, 2014). Propician la hidrofobicidad generando una barrera para evitar la ganancia o pérdida de humedad lo que garantiza la calidad de los alimentos a largo plazo (Devi *et al.*, 2024). Además, otorgan brillo a los productos mejorando el atractivo visual (Mohamed *et al.*, 2020). Cabe destacar que cuentan con propiedades mecánicas deficientes; por ello, rara vez se utilizan de forma pura en la práctica, así mismo, requieren un moldeado utilizando altas temperaturas y el uso de disolventes (McHugh, 2000).

2.1.1.4 Combinación de biopolímeros

Recientemente, los trabajos de investigación se han centrado en desarrollar biopelículas compuestas o heterogéneas, para maximizar los atributos beneficiosos de

cada componente y minimizar las limitaciones (Zhai *et al.*, 2021). El objetivo principal consiste en mejorar la permeabilidad a los gases y las propiedades mecánicas. Para ello se elaboran en forma de suspensión, emulsión, dispersión o en capas sucesivas (Guilbert, 1986; Hassan *et al.*, 2018).

Devi *et al.* (2024) explicaron que las biopelículas y recubrimientos a base de proteínas o polisacáridos que integran aceites esenciales (lípidos) bloquean el agua, son buenos agentes antibacterianos, preservan la integridad de la membrana y forman emulsiones estables a través de la reticulación entre diferentes moléculas en el material base de la membrana. Además, desarrollan propiedades mecánicas superiores (McHugh, 2000).

2.1.1.5 Aditivos

Durante la elaboración de biopelículas se incorporan diversos componentes que mejoran sus propiedades y, al mismo tiempo, contribuyen a la seguridad, nutrición y calidad de los alimentos. Entre estos aditivos se encuentran plastificantes, surfactantes, emulsionantes, antioxidantes, agentes reafirmantes de textura, antimicrobianos, nutracéuticos, saborizantes y colorantes (Solano *et al.*, 2018; Sothornvit & Krochta, 2010).

Los plastificantes son materiales de bajo peso molecular y volatilidad, con naturaleza química similar a la del biopolímero formador, se utilizan para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de las biopelículas (Bósquez & Vernon, 2005; Solano *et al.*, 2018). Estos compuestos debilitan las interacciones moleculares del biopolímero en cuestión; mejorando las propiedades mecánicas y favoreciendo la formación de una red estructural más homogénea, lo que a su vez permite una mejor distribución de las sustancias hidrofóbicas (Bósquez & Vernon, 2005). Los plastificantes comunes son: el glicerol, sorbitol, propilenglicol, sacarosa, ácidos grasos y monoglicéridos (Sothornvit & Krochta, 2005). El glicerol y el sorbitol ayudan a mejorar las propiedades mecánicas, permeabilidad al vapor de agua, propiedades térmicas y algunas veces el color, sin embargo es importante determinar el efecto del tipo y la concentración del plastificante en la formulación, ya que al modificar las fuerzas moleculares en la matriz estructural se puede afectar significativamente la funcionalidad de barrera a la transferencia de masa

(Bósquez & Vernon, 2005). Cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación y la deformación se incrementan mientras que el esfuerzo de ruptura, el módulo de Young disminuyen (Enríquez *et al.*, 2012; Otey & Westhoff, 1979). El porcentaje de inclusión de los plastificantes se encuentra entre el 10% y 30% (Anderson & Hodson, 2001).

El glicerol también denominado 1,2,3-propanetriol o glicerina, se identifica con la fórmula $C_3H_8O_3$ y peso molecular 92.09 g/mol (Sigma Aldrich, 2013b). Es un material orgánico, líquido viscoso, incoloro, inodoro, higroscópico, no tóxico, no irritante y dulce. Cuenta con una densidad de 1.261 kg/L, punto de fusión de 18.2°C y un punto de ebullición de 290°C en condiciones anhidras puras y de presión atmosférica normal (Kong *et al.*, 2016). El glicerol es un plastificante hidrófilo que, cuando se añade en concentraciones adecuadas con respecto al contenido del biopolímero, puede reducir las fuerzas intermoleculares y aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas. Este proceso se emplea comúnmente para mejorar las propiedades mecánicas de las biopelículas (Jouki *et al.*, 2013).

Los antimicrobianos tienen como objetivo extender la fase *lag* de los microorganismos, suprimiendo su ritmo de crecimiento (Ávila *et al.*, 2012; Solano *et al.*, 2018). Las sustancias más comunes incluyen sales de sorbato de potasio, ácidos orgánicos, aceites esenciales, extractos de plantas, enzimas, entre otros (Solano *et al.*, 2018).

Los agentes antioxidantes ayudan a prevenir el oscurecimiento en productos susceptibles al pardeamiento, se emplean comúnmente el ácido cítrico, ácido ascórbico, cisteína y glutatión. Por otro lado, los saborizantes, colorantes, nutracéuticos y agentes probióticos pueden mejorar las propiedades sensoriales o nutricionales de trozos de frutas y vegetales enteros o mínimamente procesados (Montero *et al.* 2009; Solano *et al.*, 2018).

En algunas aplicaciones también puede ser necesario agregar surfactantes y emulsificantes para garantizar la humectación de la superficie, buena distribución y adherencia (Sothornvit & Krochta, 2010). Además de reducir la actividad del agua

superficial y la velocidad en la pérdida de humedad (Bósquez & Vernon, 2005; Solano *et al.*, 2018).

2.1.2 Métodos para la elaboración de biopelículas

Existen diversos métodos para la elaboración de biopelículas, cada uno tiene ventajas, desventajas y aplicaciones específicas. Cabe destacar que el método de elaboración influye significativamente en las características y propiedades finales de las BP, por ejemplo, en la flexibilidad, resistencia y propiedades de barrera (Escobar *et al.*, 2011). A continuación, se describen algunos de los métodos más comunes.

2.1.2.1 Casting

Es un método ampliamente utilizado, consiste en preparar una solución filmogénica mezclando uno o varios biopolímeros con los demás componentes de la formulación en un solvente adecuado, como agua, alcohol o una mezcla multicomponente. La solución obtenida se vierte y se distribuye sobre superficies planas niveladas como cajas Petri, moldes de vidrio, teflón, acrílico, etc. Posteriormente se somete a un proceso de secado bajo condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y tiempo, asegurando la formación de una película (Carrillo, 2024). Es importante destacar que las características finales de las películas dependen de la composición de la formulación, volumen vertido y las condiciones de secado. Se debe evitar un secado rápido, ya que la reducción acelerada de la concentración del solvente limita la movilidad de las cadenas poliméricas, afectando el desarrollo de las interacciones intermoleculares (Parreidt *et al.*, 2018).

2.1.2.2 Compresión

El moldeo por compresión consiste en formar una masa o suspensión con los componentes de la película, posteriormente se vierte en un molde o se coloca entre dos placas de compresión, donde se le aplica una presión y temperatura determinada durante un tiempo establecido, de esta manera se logra la formación de la estructura (Escobar *et al.*, 2011). Es útil para crear materiales delgados, flexibles y uniformes, es un proceso relativamente sencillo que no requiere de equipos complejos y que genera pocos desechos de materiales (Mariano, 2011b).

2.1.2.3 Extrusión

El método de extrusión es un proceso ampliamente utilizado en la fabricación de películas en la industria alimentaria y de biopolímeros, se basa en la conducta termoplástica que presentan algunas proteínas y polisacáridos, los cuales al ser calentados a temperaturas superiores a su punto de transición vítrea en condiciones de bajo contenido de humedad experimentan un cambio en su estado físico (Escobar *et al.*, 2011). Se utiliza una máquina conocida como extrusora; en el cual los componentes de la película se introducen de manera continua en una tolva, una vez dentro un tornillo sin fin mezcla y funde homogéneamente los materiales a altas temperaturas. Luego, la mezcla fundida se extruye a través de un troquel que le da la forma deseada a la película, la cual se enfría rápidamente mediante un sistema de enfriamiento por aire o agua para solidificarse. Este proceso implica varias operaciones al mismo tiempo: fusión, mezcla, amasado, estiramiento y transporte. Estas características dan como resultado películas con propiedades mecánicas, de barrera y microestructurales mejoradas (Hernandez & Krochta, 2008).

2.1.3 Propiedades fisicoquímicas de las biopelículas

Las propiedades fisicoquímicas de las biopelículas depende de una combinación de factores relacionados directamente con su composición y proceso de elaboración, lo que a su vez determina su aplicación final (Solano *et al.*, 2018).

Quintero *et al.* (2010) señala que es importante estudiar y cuantificar diversos parámetros tales como; propiedades mecánicas, ópticas y antimicrobianas para determinar las posibilidades de aplicación de las BP como empaque en productos alimentarios. Solis (2016) añade que la permeabilidad al vapor de agua y a los gases, humedad, solubilidad, espesor son de gran importancia.

2.1.3.1 Color

El color es una percepción humana de la luz reflejada por un objeto, se trata de una respuesta mental al estímulo que una radiación luminosa visible produce en la retina (Delmoro *et al.*, 2010).

En el sector de embalajes alimentarios, donde las biopelículas han cobrado especial relevancia, la cuantificación del color es de suma importancia ya que influye en

la percepción del consumidor, funcionalidad y aplicación. Existen equipos especializados, como colorímetros y espectrofotómetros diseñados para la cuantificación del color de forma objetiva. Estos equipos evalúan la reflectancia o transmitancia de la luz sobre una muestra, mediante escalas de medición permiten obtener datos numéricos que describen con exactitud el color. Los colorímetros son ampliamente utilizados ya que representan menor costo, se trata de dispositivos triestimulares basados en la visión del ojo humano, cuentan con tres filtros para cada longitud de onda: filtros rojo, verde y azul, de esta forma emulan la respuesta del ojo humano al color y la luz (Mathias & Ah-Hen, 2014).

2.1.3.1.1 CIEL*a*b*

Es una de las escalas más empleadas para comparar el color perceptible al ojo humano entre dos objetos, permite especificar estímulos de color en un espacio tridimensional (Velasco, 2023). Mathías y Ah-Hen (2014) explican que las coordenadas L*a*b* son magnitudes adimensionales, cuya equivalencia con el sistema CIE XYZ, se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Donde X, Y, Z son los valores triestímulo de la muestra y X₀, Y₀ Y Z₀ son los valores del punto acromático correspondiente al iluminante empleado. La diferencia del color (ΔE) está determinada por la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{0.05}$$

Donde ΔL^* , Δa^* y Δb^* están dadas por la diferencia entre el valor de un estándar y la lectura.

La coordenada L^* recibe el nombre de luminosidad o claridad y puede tomar valores de 0 (negro) a 100 (blanco). Por otro lado, a^* y b^* son las coordenadas colorimétricas que forman un plano perpendicular al eje L^* , adquieren valores que van de -120 a 120, donde a^* presenta tonalidades rojas (valores positivos) y verdes (valores negativos) y b^* presenta tonalidades amarillas (valores positivos) y azules (valores negativos) (Figura 1).

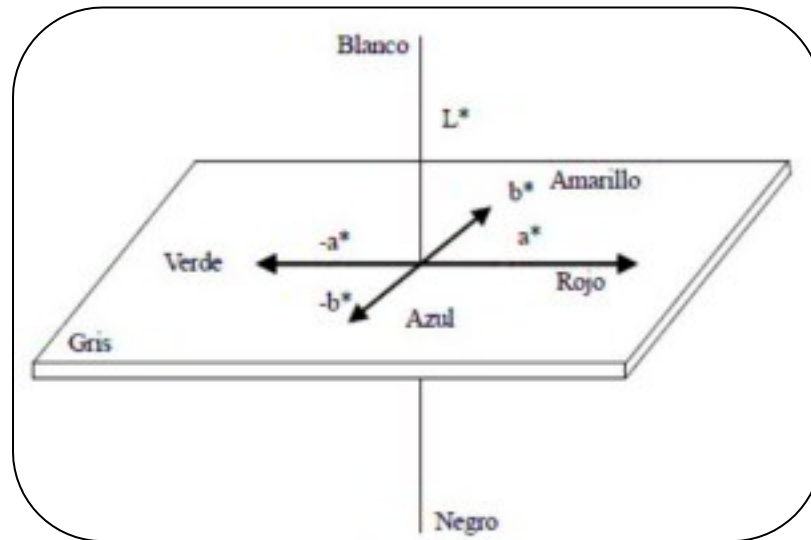


Figura 1. Espacio de color CIELAB. (Domínguez et al., 2012)

2.1.3.2 Opacidad

La opacidad es la condición en la cual un material impide parcial o totalmente el paso del haz de luz. El principio de medición por el cual se determina, es la transmitancia, que se define como el proceso físico por el cual la energía radiante que incide sobre una superficie es parcialmente transmitida, sin cambio en la frecuencia; es expresada como una relación del cociente de la energía radiante incidente y la energía radiante transmitida. En materiales de capa fina, como las biopelículas, la opacidad depende del espesor (Mariano, 2011). La cuantificación se realiza mediante espectrofotómetros. Estos instrumentos utilizan un dispositivo fotoeléctrico para medir la intensidad de la luz a diferentes longitudes de onda, dentro del rango espectral para el que fueron diseñados (Mathias & Ah-Hen, 2014).

La determinación de la opacidad en las BP es relevante para determinar su aplicación final, biopelículas opacas pueden proteger alimentos que son sensibles a la luz, de esta manera prevenir la degradación de nutrientes y la oxidación. Por otro lado, BP transparentes contribuyen a mejorar la apariencia o percepción visual a los consumidores (AINIA & AIMPLAS, 2016).

2.1.3.3 Humedad

La humedad se define como el contenido de agua presente en las biopelículas, constituye un parámetro muy importante ya que influye directamente en las propiedades de barrera, estabilidad y funcionalidad. La humedad modifica la capacidad de una biopelícula para bloquear el paso de oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua. Cuando es elevado, las propiedades de barrera suelen reducirse, ya que el agua funciona como un plastificante, incrementando la movilidad de las moléculas en la biopelícula, lo que facilita la difusión de otras sustancias a través de ella (Torregrosa, 2014). Además, un alto contenido de humedad puede promover el crecimiento de microorganismos, por lo tanto, su degradación. Un bajo contenido de humedad puede provocar la pérdida de las propiedades mecánicas (endurecimiento y fragilización) (Montenegro, 2020).

2.1.3.4 Solubilidad

La solubilidad se refiere a la capacidad de un material para disolverse en un solvente (Matthew *et al.*, 2023). En el caso de las biopelículas, este concepto es más complejo, ya que, además de disolverse, las estructuras también pueden descomponerse o hincharse; parcial o totalmente en un solvente, generalmente el agua, bajo ciertas condiciones. La determinación de la solubilidad permite estimar el tiempo que tardará en fragmentarse la biopelícula al entrar en contacto con un medio líquido, así como su capacidad para absorber agua. Esta propiedad está estrechamente vinculada con el nivel de hidrofobicidad de los materiales de la formulación, así como su capacidad para enlazar moléculas de agua (Román *et al.*, 2021).

Además, se trata de una propiedad fundamental a considerar para la aplicación de las biopelículas, ya que influye en su funcionalidad y desempeño. Biopelículas con baja solubilidad son ideales para aplicaciones donde se requiere mantener la integridad

estructural, como en la conservación de alimentos con niveles intermedios o altos de humedad, dado que limitan la transferencia de humedad y preservan las propiedades del producto. Por otro lado, biopelículas con alta solubilidad presentan ventajas en productos que necesitan rehidratación antes de su consumo (Trujillo, 2014). Este parámetro depende de diversos factores, como la composición química de los biopolímeros utilizados, el grado de entrecruzamiento molecular, la presencia de plastificantes y las condiciones de procesamiento (Matthew *et al.*, 2023).

2.1.3.5 Espesor

El espesor también denominado grosor, es la distancia que existe entre las dos caras principales de una biopelícula (Trujillo, 2014). Montenegro (2020) indica que el espesor es un parámetro muy importante, ya que puede influir en las propiedades mecánicas y de barrera de las biopelículas, por ello es importante mantener su uniformidad. El espesor generalmente se expresa en milímetros (mm) y para su medición se recomienda hacerlo a una distancia de al menos 6 mm del borde, donde la estructura es más uniforme. Además, en casos donde las biopelículas tienden a intercambiar humedad con el medio ambiente, las muestras primero deben ser colocadas en un ambiente con humedad y temperatura controladas (Trujillo, 2014). Ya que la absorción de humedad en las biopelículas a menudo produce hinchamiento y cambios en su conformación (Matta & Bertola, 2020).

2.1.3.6 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad es la capacidad de un material sólido para permitir el paso de moléculas a través de su estructura. Este proceso, conocido como permeación, implica el movimiento de pequeñas moléculas denominadas permeantes. La permeabilidad de los materiales de empaque, incluidas las biopelículas, debe coincidir con la sensibilidad del contenido envasado a ese permeante y la vida útil especificada. Algunos paquetes deben tener sellos casi herméticos, mientras que otros pueden o deben ser selectivamente permeables (McKeen, 2012).

La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se define como el producto de la difusividad y la solubilidad solo cuando se aplican plenamente las leyes de Fick y Henry (Bertuzzi *et al.*, 2007). Se trata de una medida que cuantifica la capacidad de una

biopelícula para adsorber, transferir y desorber vapor de agua a través de su estructura cuando ambos lados están expuestos a diferentes concentraciones del permeante (Garnica, 2002). Específicamente, es la cantidad de vapor de agua (g) que atraviesa la biopelícula en una unidad de tiempo (t), cuando se dan condiciones unitarias de superficie (m^2), espesor (mm) y diferencia de presión, ΔP , (mmHg) entre sus caras (Solé, 2021). Cabe destacar que es una de las propiedades más importantes, su medición permite conocer y predecir la capacidad de barrera a la humedad de las biopelículas aplicadas en el envasado de alimentos (Long *et al.*, 2023).

Existen diversos métodos para determinar la WVT, siendo las técnicas gravimétricas las más utilizadas (Aguilar, 2013). Se basan en medir el cambio de peso de una muestra expuesta a condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Dicho cambio de peso indica la cantidad de vapor de agua que atraviesa el material o que es adsorbida/desorbida por este (Garnica, 2002).

ASTM International (American Society for Testing and Materials) es una organización reconocida por desarrollar documentos esenciales que establecen procedimientos, normas y directrices para diversas industrias (ASTM, 2024). Entre su amplia colección, se encuentra uno especialmente útil para determinar la WVP. La norma ASTM-E96 establece procedimientos para medir la transmisión de vapor de agua en diversos materiales, incluidas las películas, con un límite de espesor de 32 mm (ASTM, 2017). Uno de los métodos descritos, conocido como método del desecante, consiste en sellar la muestra en la abertura de un recipiente que contiene un desecante en su interior. Este montaje se somete a un entorno con condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, y se pesa periódicamente para registrar el aumento de masa, correspondiente al vapor de agua absorbido por el desecante. Con estos datos, junto con el área expuesta de la muestra y la tasa de ganancia de peso por unidad de tiempo, se calcula la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) (Aguilar, 2013). Aunque la norma ASTM-E96 no incluye explícitamente el cálculo de la WVP, es posible derivarla a partir de la WVTR, considerando el espesor de la muestra y el gradiente de presión parcial del vapor de agua (Solé, 2021).

Existen factores que afectan la permeabilidad, algunas propiedades de los biopolímeros influyen el fenómeno de transferencia de masa: la estructura química y peso molecular, condiciones de procesamiento, efecto de volumen libre, cristalinidad, naturaleza química, naturaleza del permeante, densidad de energía cohesiva, orientación, tacticidad, entrecruzamientos, presencia de aditivos y mezclas poliméricas (Garnica, 2002).

2.1.3.7 Propiedades mecánicas

La funcionalidad definitiva de las biopelículas está relacionada con un conjunto de propiedades fundamentales a considerar, una de las más importantes son las propiedades mecánicas. Dado que las biopelículas son empleadas como embalaje; deben mantener la integridad y calidad de los alimentos durante diferentes procesos como el manejo, empaque y transporte. Las biopelículas deben poseer propiedades mecánicas adecuadas que aseguren su integridad durante el proceso de producción y prácticas de manejo, los defectos mínimos y daños estructurales como pequeños agujeros y roturas representan un daño a las propiedades de barrera (Garnica, 2002).

Las propiedades mecánicas de las biopelículas dependen en gran medida de la composición (matriz estructural, tipo-concentración de aditivos) y estructura de los componentes (masa molecular, distribución de cargas), además de la temperatura y humedad relativa del ambiente (Ramos *et al.*, 2018; Zamudio, 2014). Falguera *et al.* (2011) señala que las propiedades mecánicas no solo dependen de los compuestos utilizados en la matriz polimérica, sino también de su compatibilidad.

El comportamiento mecánico de un material representa la relación entre la fuerza ejercida sobre él y su respuesta ante la deformación. Una técnica ampliamente utilizada para analizar las propiedades mecánicas de un material consiste en someterlo a una fuerza específica mientras se controla su deformación. Para ello, se emplean equipos especializados, como el texturómetro y la máquina universal de ensayos mecánicos (Salinas, 2014). Por lo general las propiedades mecánicas de las biopelículas se evalúan mediante tres parámetros que son la resistencia a la tensión, la elongación al rompimiento y el módulo de Young (Zamudio, 2014).

La tensión es una más de las propiedades mecánicas de los materiales, se define como una fuerza por unidad de área que se aplica a un material para estirarlo. se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Tensión \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F}{A}$$

Donde:

F= Fuerza aplicada (N)

A= Área de la sección transversal sobre la que se aplica la fuerza (mm²)

La resistencia a la tensión se refiere a la máxima resistencia que presenta la biopelícula al estiramiento antes de romperse (Solano *et al.*, 2018; Yang & Paulson, 2000). Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Resistencia \ a \ la \ tensión \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F_{max}}{A_0}$$

Donde

F_{max}= fuerza máxima aplicada antes de la fractura (N)

A₀= Área de la sección transversal original (mm²)

La elongación al rompimiento se refiere a la deformación máxima que puede experimentar la biopelícula antes de su fractura (Solano *et al.*, 2018; Yang & Paulson, 2000). Por lo general se expresa en porcentaje y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Elongación \ (%) = \left(\frac{l_f - l_i}{l_i} \right) * 100$$

Donde:

l_f= longitud final (mm)

l_i=longitud inicial (mm)

Por otro lado, el módulo de Young es un parámetro elástico que se emplea para medir la resistencia de la biopelícula al experimentar algún esfuerzo de tensión o compresión (H. García, 2021). Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Módulo de Young (\%)} = \frac{\text{Resistencia a la tensión}}{\text{Elongación}} * 100$$

2.1.3 8 Propiedades antimicrobianas

La contaminación de alimentos por patógenos ha impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria. Entre ellas, las biopelículas con propiedades antimicrobianas (Valenzuela & Arias, 2012). Las cuales se definen como sistemas de envasado activo que incorporan agentes antimicrobianos para inhibir el crecimiento de microorganismos (Hernández *et al.*, 2011). Un agente antimicrobiano se define como una sustancia química que, a bajas concentraciones, actúa contra los microorganismos, destruyéndolos o inhibiendo su crecimiento (Scientific Committees, s. f.). Pueden ser compuestos sintéticos o de origen natural (Hernández *et al.*, 2011).

La mayoría de los antimicrobianos tienen un efecto bacteriostático o fungistático, es decir, inhiben la multiplicación de las bacterias y hongos. Sin embargo, pocos poseen acción bactericida o fungicida, capaz de destruirlos. El mecanismo de acción de los antimicrobianos, es variado y depende de la sustancia en cuestión. Pueden actuar de diferentes maneras ya sea en la pared celular, membrana celular o en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos. Esto puede causar daños irreparables en una célula (Rodríguez, 2011).

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones enfocadas en identificar y evaluar materiales que, al incorporarse a películas comestibles, potencien su acción antimicrobiana, prolongando así la vida útil de los alimentos (Rout & Pradhan, 2024). Por ejemplo:

- El ácido sórbico y el sorbato de potasio han demostrado ser activos contra levaduras, hongos y bacterias, por ello se han adicionado a películas comestibles para minimizar la contaminación microbiana en los alimentos (Romero *et al.*,

2011). De igual manera otros ácidos orgánicos y sus sales como el benzoato de sodio y el propionato de sodio (Pérez *et al.*, 2012).

- Se ha investigado el efecto inhibitorio de polisacáridos como el quitosano, el cual es un derivado deacetilado de la quitina presente en organismos como crustáceos, insectos y hongos (Rodríguez, 2011). Las películas de quitosano han demostrado una alta actividad contra patógenos, como hongos, levaduras, bacterias Gram-positivas y negativas, disminuyendo el deterioro de los alimentos de origen animal y vegetal (Valenzuela & Arias, 2012).
- Algunos aceites esenciales son reconocidos por su actividad antimicrobiana, y recientemente se han propuesto para incorporarse en empaques alimentarios (Hernández *et al.*, 2011). Los aceites procedentes del clavo, canela, mostaza, orégano, romero y tomillo son los que poseen actividad antimicrobiana más acentuada ya que contienen un alto porcentaje de compuestos fenólicos (Romero *et al.*, 2011).
- Se han incorporado nanopartículas de diversa naturaleza a biopelículas y recubrimientos comestibles para potenciar su acción antimicrobiana. Entre estos materiales se encuentran las nanopartículas inorgánicas como óxido de zinc (ZnO), plata (Ag), dióxido de silicio (SiO₂) y dióxido de titanio (TiO₂) Para evaluar la actividad antimicrobiana en biopelículas, se puede usar el método de difusión en agar. El cual consiste en colocar un disco de biopelícula en una caja Petri con un medio de cultivo determinado, ésta previamente se inocula con el microorganismo de interés. Si la biopelícula presenta propiedades antimicrobianas se formará una zona de inhibición visible alrededor del disco después de periodo de incubación. Por el contrario, si la zona de inhibición no es clara después de la incubación, se asume que la película y el agente antimicrobiano adicionado no lograron inhibir el crecimiento del microorganismo, lo que podría indicar una ausencia de actividad antimicrobiana o una concentración insuficiente del agente para generar una respuesta efectiva contra el microorganismo (Totosaus *et al.*, 2016).

2.2 Jícama

La jícama (*Pachyrhizus erosus*.) también conocida como nabo mexicano, es una planta perteneciente a la familia de las fabáceas o legumbres, se cultiva especialmente por sus raíces tuberosas (FIRCO, 2018), las cuales son comestibles. Presentan un peridermo color marrón oscuro, una morfología ovalada con un diámetro que oscila entre 10 y 20 cm en su sección más ancha, pueden llegar a pesar de 0.5 a 2.5 kg, su estructura interna es jugosa y está compuesta por una pulpa blanca que es rica en almidón, de textura crujiente y un sabor sutilmente dulce (A. M. Ramos *et al.*, 2013; SIAP & SADER, s. f.). Su denominación deriva del término náhuatl "xicamatl", que se traduce como "raíz de agua" (FIRCO, 2018), es nativa de México y Centroamérica, donde fue cultivada y consumida por diversas civilizaciones prehispánicas. Durante la época de la conquista, su cultivo se introdujo en Asia por los españoles. Como resultado, en la actualidad es conocida, consumida y apreciada en muchos países a nivel global (Tufiño, 2014).

Por lo general la jícama se consume fresca (en ensaladas o cortada y condimentada con limón, sal y chile), cocinada (en sopas, asada o frita) o en forma de harina para la elaboración de postres (FAO, 2024; SADER, 2019). Recientemente se ha estado utilizando en la industria alimentaria como emulsionante, en la fabricación de monosacáridos, oligosacáridos, jarabes de glucosa, harinas, productos lácteos y material de embalaje (Kishore *et al.*, 2024).

2.2.1 Producción en México

El género *Pachyrhizus spp.* comprende cinco especies, de las cuales solo *P. tuberosus*, *P. ahipa* y *P. erosus* son cultivadas para consumo humano, ya que *P. panamensis* y *P. ferrugineus* se encuentran en estado silvestre (A. M. Ramos *et al.*, 2013). En México la especie *P. erosus* es cultivada a escala comercial (Castañeda, 2000). Los principales estados productores son: Baja California Sur, Campeche, Colima, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Veracruz y Yucatán (Axayacatl, 2022). Las variedades más utilizadas son: agua dulce, cristalina, precoz, San Juan, Vega de San Juan y San Miguelito (Santoyo, 2014). En 2020, México registró una producción de jícama de 238, 980 toneladas, las cuales se obtuvieron de 8, 260 hectáreas

cosechadas. El rendimiento promedio nacional fue de 28.9 toneladas por hectárea. El precio promedio por tonelada fue de 3,588 pesos, por lo que el valor de la producción para dicho cultivo fue de 857 millones de pesos (Axayacatl, 2022).

2.2.2 Jícama de descarte

En México, se estima que aproximadamente el 25% de la producción total de jícama se pierde a lo largo de la cadena de distribución debido al descarte de aquellos tubérculos que no cumplen con los estándares comerciales de calidad, determinados por parámetros como tamaño, morfología, color y presencia de defectos físicos o deterioro. Actualmente, estos tubérculos son deshidratados sin un aprovechamiento adicional, a pesar de que conservan su composición nutricional y potencial funcional. Esta pérdida representa una oportunidad para su valorización mediante estrategias de revalorización agroindustrial (B. A. García et al., 2024).

2.2.3 Composición proximal y química

La jícama se compone principalmente de agua, hasta un 90% de su peso total (Montes, 2019). Presenta una buena concentración de carbohidratos, específicamente polisacáridos como el almidón y la fibra (como la inulina), además contiene oligo-fructosa compuesto que le proporciona un ligero sabor dulce (FIRCO, 2018; Fonseca, 2022). También posee una cantidad relativamente baja de proteínas, equivalente a la mitad de la cantidad presente en papas normales; sin embargo, su perfil de aminoácidos es de gran interés ya que contiene los esenciales para la dieta del hombre, por lo que se recomienda su consumo (Burciaga, 2001). Además, contiene trazas de lípidos y minerales (FIRCO, 2018). La composición proximal de la jícama especie *P. erosus* se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1. Contenido proximal de la jícama

Componente	%
Humedad	81.00- 89.90
Materia seca	10.00- 19.00
Carbohidratos	5.20-14.90
Proteínas	1.23- 2.00

Grasas	0.09- 0.70
Cenizas	0.50- 0.90

(Ramos *et al.*, 2013)

La composición química (Tablas 2,3 4,5) puede variar dependiendo de la especie, época de siembra y etapas de desarrollo (Kishore *et al.*, 2024). Se ha demostrado que a lo largo de su desarrollo los tubérculos presentan cambios en su contenido de proteína, fibra, cenizas, lípidos y carbohidratos. En el proceso de maduración la concentración de almidón aumenta, por otro lado los azúcares, inulina, grasas, minerales como el sodio y las proteínas disminuyen (Fonseca, 2022).

Tabla 2. Contenido de carbohidratos de la jícama

Componentes	%
Fibra	0.7
Almidón	9.4- 22.50
Amilosa	23.6
Amilopectina	76.4

(Ramos *et al.*, 2013)

Tabla 3. Contenido de minerales de la jícama

Componentes	mg/100 g
Calcio	317.00
Cobre	0.27
Hierro	10.44
Magnesio	38.00
Manganeso	1.35
Fósforo	83.00
Potasio	150.00
Sodio	31.00
Zinc	2.34
Selenio	0.03
Cloro	<0.1

Azufre	15.00
Cobalto	0.01
Níquel	0.27
Cromo	0.18

(Ramos *et al.*, 2013)

Tabla 4. Contenido de aminoácidos de la jícama

Componentes	mg/kg
Alanina	380-3500
Arginina	720-6635
Acido aspártico	3870-35670
Cistina	110- 1015
Acido glutámico	820- 2855
Glicina	310- 2855
Histidina	370- 3410
Isoleucina	310- 2855
Leucina	410- 4425
Lisina	510-4700
Metionina	130- 1200
Fenilalanina	320-2950
Prolina	430-4330
Serina	470- 4330

(Abud *et al.*, 2008)

Tabla 5. Contenido de vitaminas de la jícama

Componentes	mg/ 100 g
Vitamina C	14
Niacina	0.2
Riboflavina	0.02
Tiamina	0.05
Piridoxina	0.25

(Ramos *et al.*, 2013)

2.3 Almidón

El almidón es considerado uno de los polímeros más prometedores para la elaboración de biopelículas debido a su bajo costo, alta disponibilidad y origen natural. Pese a ello presenta varias limitaciones, tales como: propiedades mecánicas deficientes, alta permeabilidad al vapor de agua, tendencia a la retrogradación, rigidez excesiva y fragilidad. Por esta razón, es importante incorporar otros componentes que permitan mitigar estas limitaciones (Enríquez *et al.*, 2012).

Se trata del segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa (Moreno *et al.*, 2024). Es una fuente de energía para todos los organismos superiores, y se encuentra de forma granular en semillas, raíces y tubérculos de productos agrícolas como el maíz, arroz, trigo, yuca, frijol, papa, sorgo, etc. (Schmiele *et al.*, 2019). Estructuralmente se define como un poliglucano, es decir, un polímero formado de unidades de D-glucosa, está compuesto por 20% de amilosa, 80% de amilopectina y una pequeña fracción de conformación no glucosídica como minerales y lípidos, composición que varía de 1-2% en función de la procedencia botánica (Montoya, 2015; Ventura *et al.*, 2024).

La amilosa (Figura 2) está formada por unidades de cadena lineal 1,4- α -D-glucopiranososa. Por su parte la amilopectina (Figura 3) es una molécula ramificada formada por unidades de α -1,6-glucósido (Fama *et al.*, 2005; Solano *et al.*, 2018). Las moléculas de amilosa y amilopectina se entrelazan y se disponen radialmente en capas concéntricas formando estructuras esféricas, las cuales se les conoce como gránulos de almidón (Toledo, 2011).

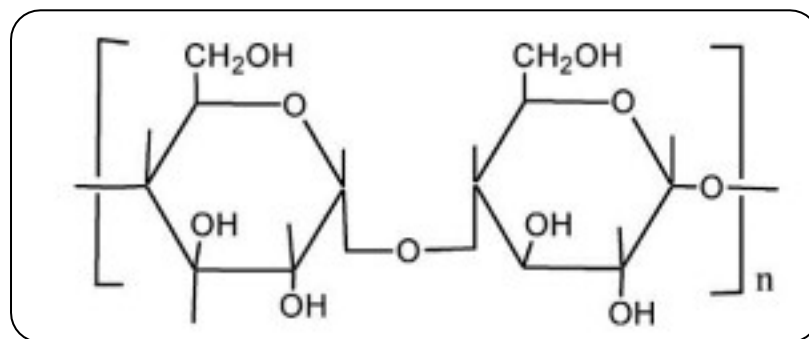


Figura 2. Estructura química de la amilosa. (Hassan *et al.*, 2018)

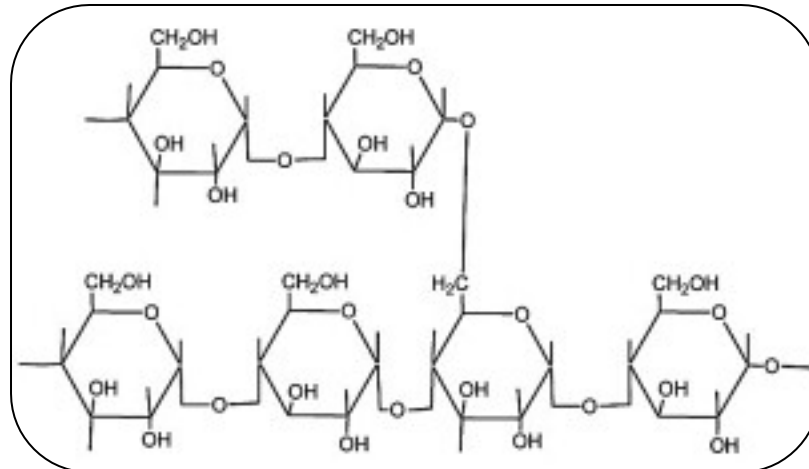


Figura 3. Estructura química de la amilopectina. (Hassan et al., 2018)

Cabe destacar que la funcionalidad de los almidones, viscosidad, capacidad de absorción e índice de solubilidad dependen de la relación amilosa/amilopectina, pero también del tamaño, forma y tipo de cristales que tienen los gránulos de almidón (Toledo, 2011).

2.3.1 Gelatinización

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría pero cuando se someten al proceso de gelatinización, pierden su ultraestructura semicristalina de manera irreversible y se convierten en una matriz continua. Esta propiedad ha permitido que el almidón sea utilizado ampliamente para producir plásticos biodegradables (Biliaderis, 2009). La gelatinización se define como un proceso físico en el cual los gránulos de almidón se calientan lentamente; con poca agitación y en presencia de agua, con la finalidad de promover la imbibición, hinchamiento y liberación de amilosa y amilopectina durante un periodo prolongado, formando una solución espesa debido a los numerosos enlaces de hidrógeno que se forman con el agua (Schmiele et al., 2019).

Este proceso se desarrolla en tres fases: (1) hinchamiento granular, (2) ruptura de la estructura de amilopectina, y (3) solubilización de amilosa/amilopectina. Inicialmente, los gránulos de almidón experimentan hinchamiento debido a la absorción de agua en sus regiones amorfas. Este proceso es reversible si la temperatura se mantiene por debajo del punto de gelificación; sin embargo, al superar dicho punto, los gránulos de almidón empiezan a colapsar. Las moléculas de agua, al ser muy pequeñas, se difunden

fácilmente a través de los grupos de amilopectina semicristalina, rompiendo los enlaces de hidrógeno y promoviendo la disociación completa de las cadenas de amilosa y amilopectina. Posteriormente, estas moléculas solubilizadas se entrelazan en una fase continua para formar la película de almidón. Aunque las películas de almidón son esencialmente amorfas, pueden exhibir cierto grado de ordenamiento molecular si la ruptura es parcial o si la amilosa y la amilopectina sufren recristalización con el tiempo, fenómeno conocido como retrogradación, que está influenciado por las condiciones de almacenamiento (Biliaderis, 2009; Pelissari *et al.*, 2009).

2.3.2 Tipos de almidón

2.3.2.1 Almidón nativo

Se denomina almidón nativo al producto extraído que no ha sufrido ningún tipo de alteración química en su estructura. Es bien sabido que el almidón nativo muchas veces no cumple con la funcionalidad requerida para diferentes aplicaciones, ya que presenta baja resistencia a esfuerzos de corte, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis. Estas limitaciones se pueden superar modificando la estructura nativa por métodos químicos, físicos y/o enzimáticos dando como resultado un almidón modificado (Lisi, 2012; Moreno *et al.*, 2024).

2.3.2.2 Almidón modificado

Los almidones modificados son aquellos que se someten a una serie de técnicas químicas, físicas, biológicas o enzimáticas para cambiar su estructura nativa, con la finalidad de mejorar sus atributos positivos y eliminar sus deficiencias (Kaur *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2018; Schwartz *et al.*, 2009).

2.3.3 Almidón de jícama

El almidón de jícama presenta un tamaño de gránulo menor a 10 μm , forma esférica semejante al almidón de maíz, elevada capacidad de absorción de agua de 2.6 y 8.5 a 50 y 80°C respectivamente, poder de hinchamiento entre 10-14 gg^{-1} a 55 y 93°C, solubilidad de 2.9%, patrón de difracción de rayos-X de tipo A, cristalinidad total de 21.3% y gel con buena estabilidad a la refrigeración 2.6%/144h (Martínez *et al.*, 2005). La composición química proximal del almidón de jícama se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición química proximal del almidón de jícama

Humedad (%)	5-6.66
Cenizas (%)	2.42-2.44
Lípidos (%)	0.16-0.23
Proteína (%)	0.53-0.61
Fibra (mg/100g)	157-170
Carbohidratos totales (g/100g)	1.40-1.50
Amilosa (%)	33.49-34.37
Amilopectina (%)	65.64-66.51

(Ramirez *et al.*, 2023)

2.4 Hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio también denominado cal hidratada o cal apagada, con fórmula Ca(OH)_2 , es un compuesto inorgánico de gran relevancia. Se describe como un polvo fino, blanco, inodoro, alcalino (pH de 12.8) y ligeramente soluble en agua, que se obtiene por la hidratación del óxido de calcio en equipos denominados hidratadores. O bien como subproducto al procesar residuos que contienen calcio, por ejemplo: en la mezcla de cloruro de calcio con hidróxido de sodio o la reacción de carburo de calcio con agua (Estrela & Pecora, 2003; J. R. Romero & Llorente, 2013; Suministro de Especialidades, 2018).

En el sector alimentario tiene diversas aplicaciones: en la industria azucarera se utiliza principalmente para separar el azúcar de la caña y para purificar y mejorar la calidad del producto final (Estrela & Pecora, 2003); mientras que en la industria láctea se emplea como agente regulador de la acidez, ayudando a neutralizar o reducir el pH en la elaboración de productos como leche, mantequilla y crema. Sin embargo, su uso es limitado debido a las buenas prácticas de manufactura y las regulaciones de seguridad alimentaria, que buscan garantizar la calidad y la seguridad de los productos lácteos (Correa & Santillán, 2016; OMS & FAO, 2011). En el proceso de nixtamalización del maíz, se usa para suavizar el grano ya que facilita la remoción del pericarpio durante la cocción y reposo, además controla la actividad microbiana, mejora la calidad nutricional,

sabor, aroma, color y vida de anaquel de los productos elaborados a partir de masa de maíz (Castillo *et al.*, 2009). Además, se utiliza para la elaboración de refrescos, bebidas no alcohólicas y carbonatadas, sal de mesa, gelatinas y confitería. Así como para la conservación de frutas y verduras (Sigma Aldrich, 2013).

2.5 Nanopartículas

El interés por los nanomateriales, especialmente las nanopartículas ha aumentado en los últimos años, gracias a sus propiedades físicas y químicas, ya que resultan ser únicas y superiores en comparación con los materiales a granel (Jayaraj *et al.*, 2024). Las nanopartículas (NP) son estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros (1×10^{-7} m) que pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, para observarlas se requieren microscopios de alta resolución como el electrónico de barrido (SEM) o el electrónico de transmisión (TEM) (Gómez, 2018).

En la industria alimentaria, se han llevado a cabo investigaciones donde se reporta que el uso de NP en el embalaje de alimentos puede mejorar las propiedades fisicoquímicas, hidrofobicidad y biodegradabilidad de los materiales empleados. Además, algunas propician efectos antimicrobianos, bioactivos e inteligentes (Almeida *et al.*, 2015). Dependiendo de la naturaleza de las NP, estas pueden mejorar las propiedades mecánicas, de barrera y propiedades bactericidas del polímero (Silva *et al.*, 2018).

Dentro de las nanopartículas más estudiadas se encuentran las NP de celulosa que mejoran las propiedades de barrera contra la humedad de los polímeros. Así mismo, las NP de arcillas y silicatos al ser añadidos a biopolímeros mejoran la resistencia mecánica y disminuyen la permeabilidad al vapor de agua. También las NP basadas en óxido de magnesio, óxido de cobre, óxido de calcio, óxido de zinc, dióxido de titanio y plata debido a su potencial antimicrobiano (Almeida *et al.*, 2015).

2.6 Nanopartículas de hidróxido de calcio

Actualmente, el uso de nanopartículas de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ -NP) en películas y recubrimientos es un campo de investigación en desarrollo. Si bien existen algunos estudios donde se utilizaron nanopartículas derivadas del calcio, la cantidad de publicaciones al respecto es bastante reducida en comparación con otros tipos de nanopartículas. Silva *et al.* (2018) expone que las nanopartículas de óxido de calcio (CaO -

NP) se han vuelto atractivas para su aplicación como agente biocida en envases alimentarios, pero que su uso en polímeros ha sido raramente reportado. Debido a ello desarrollaron una película de polietileno, polipropileno, poliestireno, ácido poliláctico, polihidroxibutirato, ácido poliglicólico y mezclas de dos o más de estos componentes adicionando CaO-Np en una cantidad de 3 a 10% del peso total. Los resultados indicaron que hubo efectividad antimicrobica en particular contra *E. Coli*

Por otro lado, un estudio realizado por Cid (2020) propuso la aplicación de un recubrimiento de látex de poli(acetato de vinilo-co-alcohol vinílico) adicionado con CaO-NP, para evaluar su efecto en la postcosecha de pepino, los resultados mostraron que la adición de CaO-NP al recubrimiento mejoró las propiedades del material conservando propiedades químicas y aumentando compuestos nutraceuticos en los frutos durante el almacenamiento. Limón *et al.* (2022) estudió el efecto de las nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO₃-NP) y plastificantes (sorbitol-glicerol 80-20% p/p) en películas comestibles producidas mediante tecnologías combinadas de extrusión y casting, los resultados indicaron que las películas resultaron tener mayor resistencia a la rotura y deformación, así como menor permeabilidad al vapor de agua y solubilidad.

En base a lo anterior, se propone que la incorporación de Ca(OH)₂-NP a biopelículas de almidón de jícama podría generar cambios en el polímero, mejorando sus propiedades mecánicas y de barrera. Además, podría otorgar propiedades antimicrobianas, lo que aumentaría su viabilidad para aplicaciones en productos alimenticios.

METODOLOGÍA

La fase experimental de este proyecto de investigación consistió de cuatro etapas, las cuales fueron: obtención del almidón de jícama, elaboración de las biopelículas, caracterización de las propiedades fisicoquímicas y evaluación de las propiedades antimicrobianas.

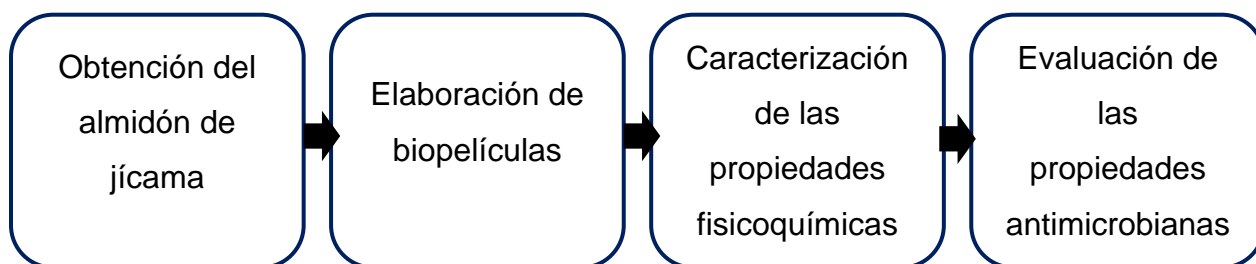


Figura 4. Etapas de la fase experimental.

3.1 Materiales, equipos y reactivos

Los materiales, equipos y reactivos utilizados se enlistan a continuación.

3.1.1 Materiales

- Aluminio
- Agitadores magnéticos
- Asa bacteriológica
- Cajas Petri
- Celdas para espectrofotómetro
- Charolas de aluminio
- Colador
- Cuchillos
- Cubetas de plástico (20 L)
- Espátulas
- Frascos herméticos
- Gradilla
- Hojas blancas
- Lámparas de alcohol
- Matraz aforado (25, 50, 100 mL)

- Matraz Erlenmeyer (250 y 500 mL)
- Pinza para crisol
- Pinzas de disección
- Probetas graduadas (50, 100 mL)
- Tablas para picar
- Tamiz (Tamiz Humboldt núm. 100)
- Tela para filtrar
- Termómetro
- Tubos Eppendorf
- Tubos falcón
- Vasos de plástico (50 mL)
- Vasos de precipitado (250, 500 y 1000 mL)
- Vernier

3.1.2 Equipos

- Autoclave digital (Felisa FE-398)
- Balanzas analíticas (OHAUS Pioneer PA224, Precisa XT220A)
- Cámara climática (Luzeren PQX-350H)
- Cámara de seguridad biológica (Prendo CSB120)
- Celdas de permeabilidad
- Mini Centrífuga (Science Med SM1008)
- Colorímetro digital (FRU, WR-10QC)
- Desecador
- Espectrofotómetro (GENESYS 10S UV-VIS SPECTRONIC)
- Horno de circulación forzada (Yamato DKN602L)
- Horno de secado de aire forzada (BIOBASE BOV-D125)
- Incubadora (Felisa)
- Licuadora convencional (Oster BLSTPEG-MRT)
- Licuadora industrial (Tapsica T12L3540 RPM)
- Mezclador Vortex (OHAUS, VXMNDG)
- Micrómetro digital (Mitutoyo absolute 547-400S).

- Micropipetas (DLAB, Science Med)
- Parrillas de calentamiento y agitación (Luzeren, Talboys, DLAB MS7-H550-S)
- Texturómetro (BROOKFIELD CT3)

3.1.3 Reactivos

- Hidróxido de sodio anhidro (NaOH)
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Cloruro de calcio anhidro (CaCl₂)
- Cloruro de sodio (NaCl)
- Caldo soya tripticaseína
- Agar para método estándar
- Ampicilina (Ampigrin 500 mg)
- Dimetilsulfóxido (DMSO)
- Yodo (I₂)
- Yoduro de potasio (KI)
- Bromuro de Sodio (NaBr)

3.2 Materia prima

La jícama utilizada en este proyecto de investigación procede de la región sureste de Jala Nayarit y fue adquirida en la central de abastos de Saltillo, Coahuila.

El almidón de jícama se extrajo en el Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, campus Saltillo, Coahuila.

Las nanopartículas de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂-NP) fueron adquiridas de manera comercial a la empresa NANOSHEL, a través del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

Las cepas bacterianas: *Salmonella Typhimurium*, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* utilizadas en las pruebas antimicrobianas fueron proporcionadas por la División de Ingeniería en Industrias Alimentarias del Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo ubicado en Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

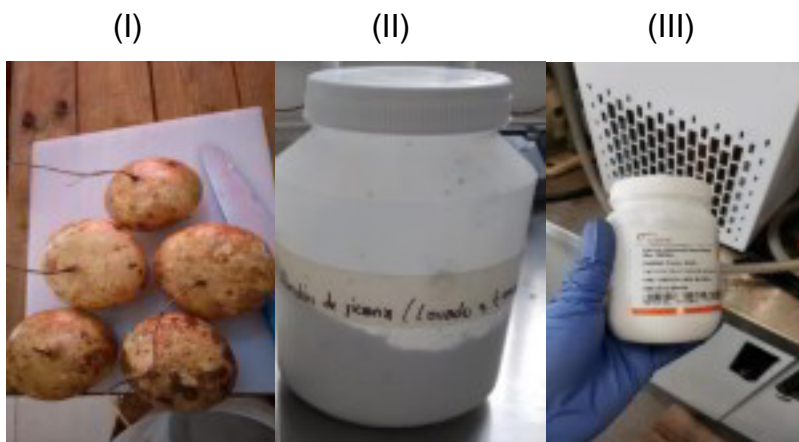


Figura 5. Jícama (I), almidón de jícama (II), nanopartículas de hidróxido de calcio (III).

3.3 Obtención del almidón de jícama

3.3.1 Extracción

El almidón de jícama se extrajo basándose en la metodología descrita por Flores *et al.* (2004) con algunas modificaciones. Los tubérculos fueron lavados, pelados y cortados en cubos de aproximadamente 6 cm, se colocaron dentro de una licuadora industrial con agua destilada para realizar una molienda húmeda, la pasta se filtró y se lavó hasta que dejó de presentar líquido remanente. La solución resultante fue refrigerada 24 h, una vez transcurrido este tiempo; se eliminó el sobrenadante y se recuperó el sedimento de almidón, el cual se secó en un horno de circulación forzada a 40°C durante 24 h. Posteriormente, se molió usando una licuadora convencional, se tamizó y se almacenó en frascos herméticos hasta su purificación.

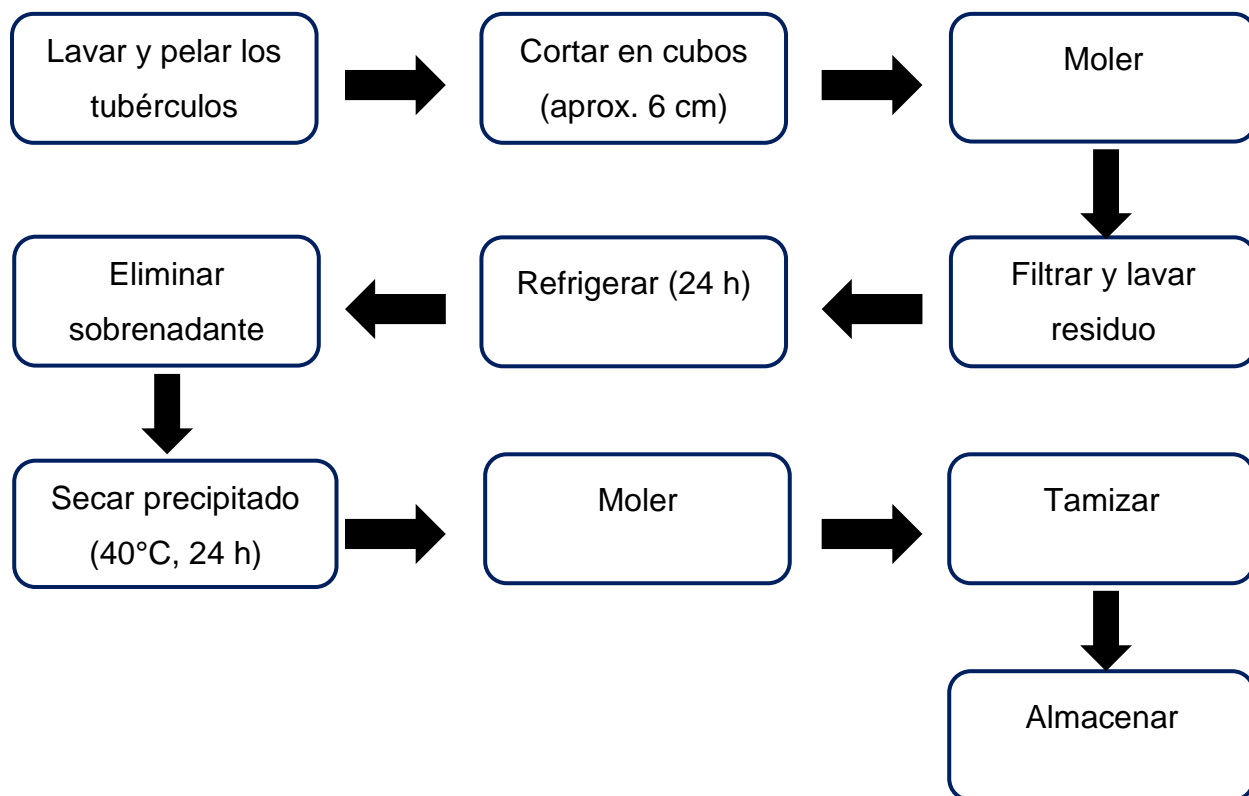


Figura 6. *Extracción del almidón de jícama.*



Figura 7. *Jícama (I), molienda húmeda (II), almidón nativo (III).*

3.3.2 Purificación

La purificación se realizó para eliminar los lípidos y proteínas presentes en el almidón de jícama. De acuerdo a la metodología aplicada por Dai *et al.* (2015) se realizaron tres lavados (400g almidón/1L de agua destilada): 1) lavado con NaOH 0.05 M, 2) lavado con

HCl 0.1 M y 3) lavado con agua destilada para eliminar NaCl que pudo haberse formado. En cada caso la mezcla resultante se agitó constantemente a 800 rpm durante 60 minutos con ayuda de un agitador magnético en una parrilla con agitación, se dejó reposar 4 h y se descartó el sobrenadante. La pasta de almidón que se obtuvo de los tres lavados, se llevó a secar a 40°C por 24 h en un horno de circulación forzada, después se molió en una licuadora convencional, se tamizó y se almacenó en frascos herméticos hasta su uso.

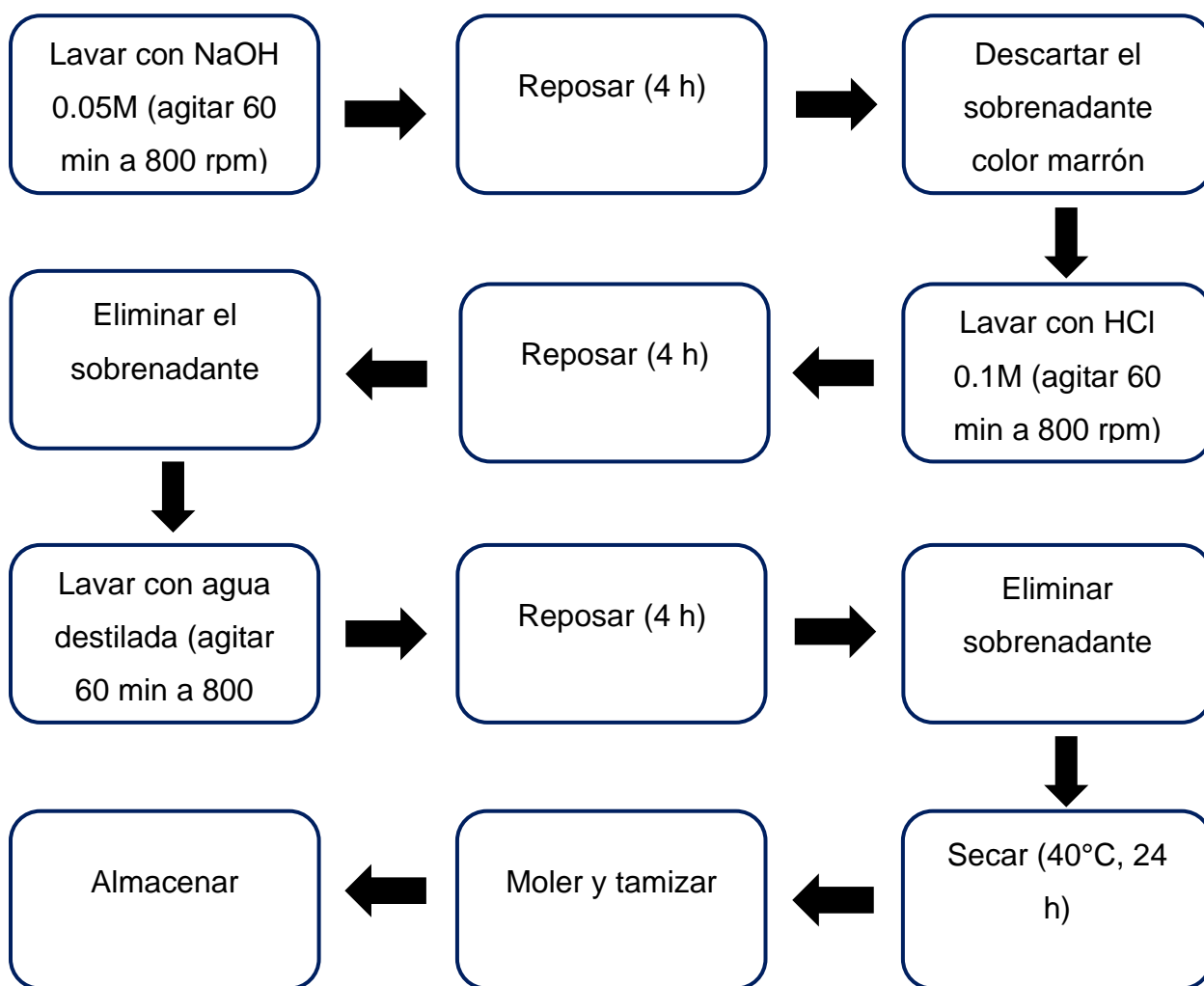


Figura 8. Purificación del almidón de jícama.

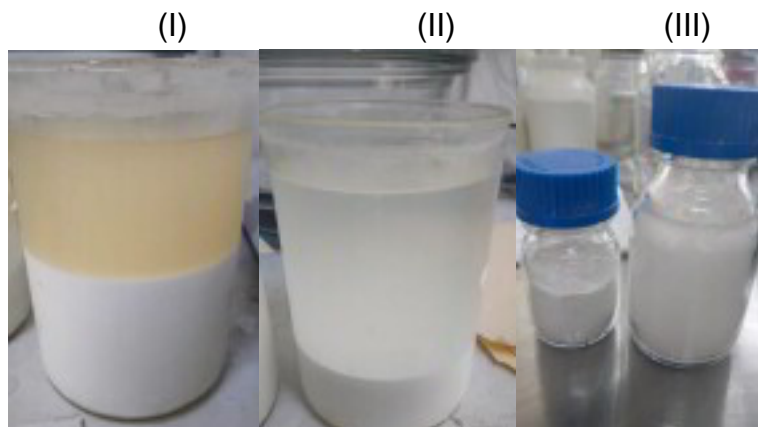


Figura 9. Lavado con NaOH (I), lavado con HCl (II), almidón de jícama purificado (III).

3.3.3 Contenido de amilosa del almidón de jícama

El contenido de amilosa del almidón de jícama se cuantificó mediante un método colorimétrico con yodo. De acuerdo a la metodología descrita por McGrance *et al.* (1998), se preparó una disolución mezclando 20 mg de almidón con 8 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) al 90% y se colocó en baño maría a 85°C durante 2 horas. Trascurrido el tiempo, la solución fue enfriada y transferida a un matraz volumétrico de 25 mL donde se ajustó el volumen con agua destilada. Posteriormente, se tomó una alícuota de 1 mL a la cual se le agregaron 5 mL de I_2/KI (0.0025/0.0065 mol/L) y se ajustó a un volumen final de 50 mL con agua destilada. La solución se dejó reposar 15 min. para después leer la absorbancia en un espectrofotómetro a 600 nm. Para la construcción de la curva estándar se utilizó amilosa pura de papa; siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente usando alícuotas de 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mL.

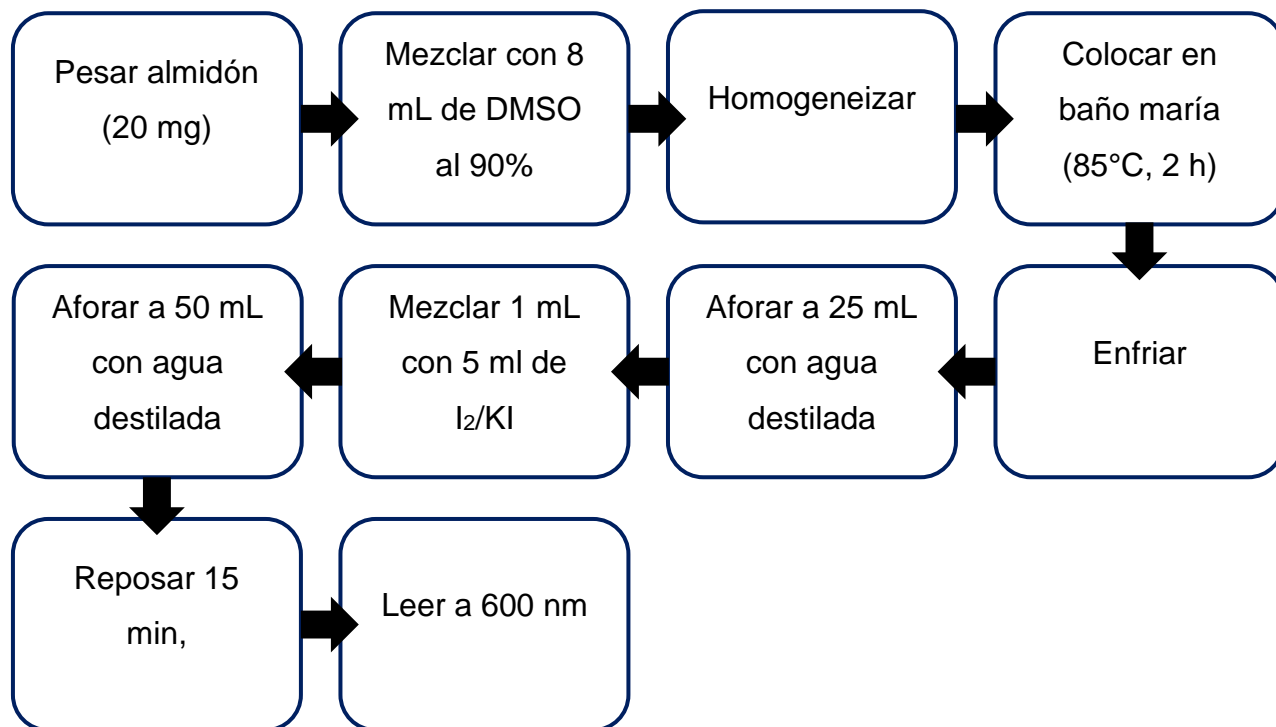


Figura 10. Determinación del contenido de amilosa del almidón de jícama.

(I)

(II)

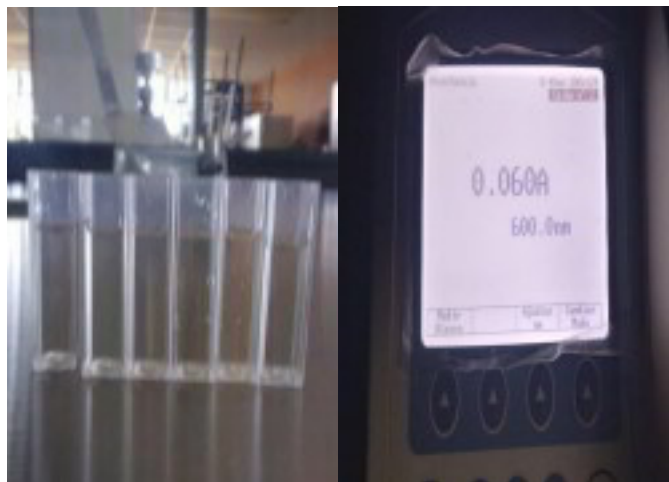


Figura 11. Reacción con yodo (I), lectura en espectrofotómetro (II).

3.4 Elaboración de las biopelículas

Se implementó un diseño de mezclas tipo Centroide Simplex con 13 distintas formulaciones, en las cuales varió la concentración de almidón de jícama y glicerol. Para el almidón se establecieron límites de 1.5857% y 4.4142%, mientras que, para el glicerol, los límites oscilaron entre 0.8529% y 1.857%. Posteriormente, se aplicó un diseño de superficie de respuesta (MSR) con el objetivo de identificar la formulación óptima a la cual se le adicionaron las $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$. En este paso, se utilizaron como variables de respuesta los parámetros de elongación al rompimiento y resistencia a la tensión.

Posteriormente se implementó un diseño experimental completamente al azar (DCA) unifactorial, en el cual la variable independiente fue la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$; con cuatro niveles de tratamiento: 0, 50, 100 y 150 ppm.

Las BP se elaboraron mediante el método de vaciado en placa y siguiendo la metodología descrita por Algecira & Saavedra (2010) con algunas modificaciones. Se preparó una solución filmogénica dividiendo un volumen de agua destilada en dos partes iguales. En una de ellas se disolvió y pregelatinizó almidón de jícama, mientras que en la otra se incorporó glicerol, posteriormente ambas soluciones se mezclaron. Además de acuerdo a la metodología aplicada por Cid (2020) se adicionó 50, 100 y 150 ppm de $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$, previamente dispersas en el glicerol, para evitar la formación de grumos. En cada caso se mantuvo constantemente una temperatura de 70°C, agitación de 600 rpm durante 10 min. y la boca del recipiente cerrado. Finalmente se vertió 30 mL de la mezcla final en cajas Petri y se secó en un horno de secado de aire forzada a 38°C durante 12 h.

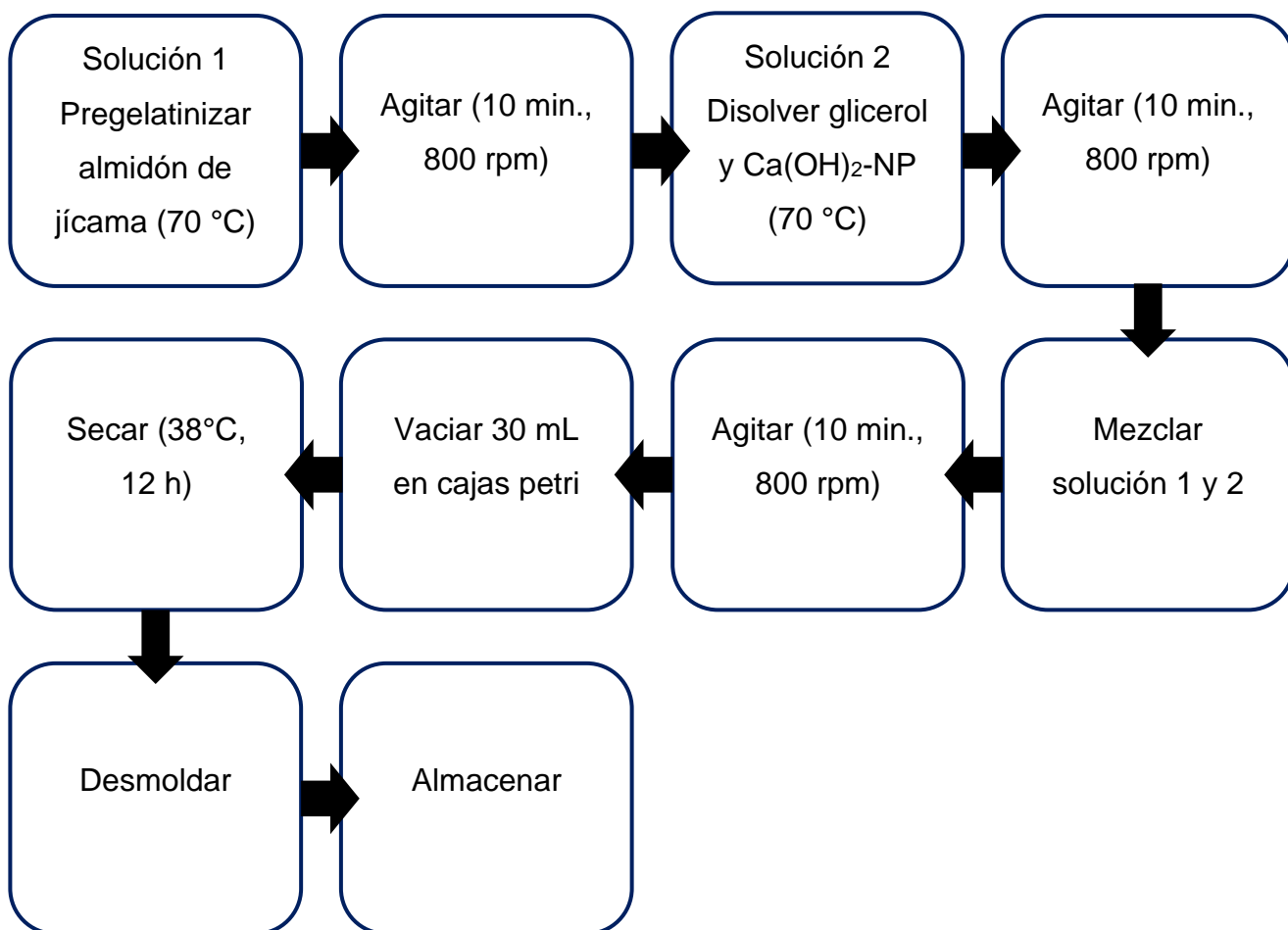


Figura 12. Elaboración de las biopelículas.

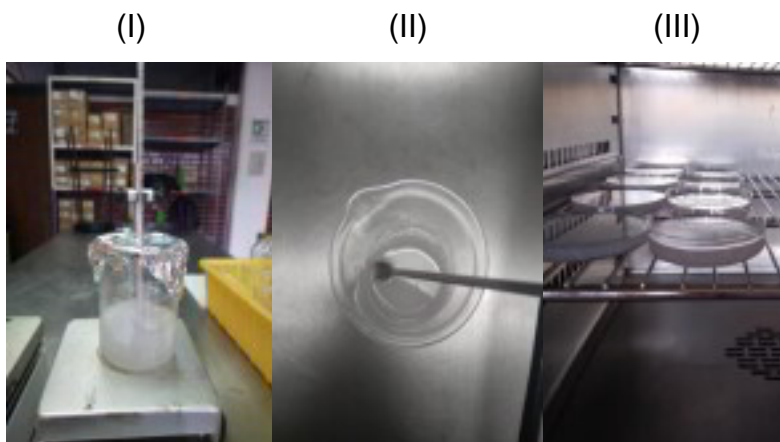


Figura 13. Almidón pregelatinizado (I), $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ dispersas en glicerol (II), secado de biopelículas (III).

3.5 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas

3.5.1 Evaluación cualitativa

La evaluación cualitativa de las BP se realizó conforme a la metodología descrita por De Morales (2013). Se analizaron tres aspectos: 1) manejabilidad, 2) continuidad y 3) uniformidad. La manejabilidad indicó la capacidad de las BP para manipularse sin sufrir daños estructurales, la continuidad se refirió a la ausencia o presencia de roturas y la uniformidad evaluó la homogeneidad de la superficie. Para cada aspecto, se asignó un valor "Sí" o "No".

3.5.2 Humedad

La humedad se determinó por gravimetría siguiendo la metodología descrita por Cedeño *et al.* (2023) con algunas modificaciones. Las BP se recortaron en cuadros de 2x2 cm, se pesaron en una balanza analítica, se colocaron en charolas de aluminio previamente secadas, pesadas e identificadas y se sometieron al proceso de secado en un horno de secado de aire forzada a 105°C durante 24 h. Transcurrido el tiempo se atemperaron 30 min. en un desecador y finalmente se volvieron a pesar. La determinación se realizó por quintuplicado para cada tratamiento. Los resultados obtenidos se expresaron en porcentaje de humedad aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} * 100$$

Donde:

m_1 = peso del crisol de porcelana con BP húmeda (g).

m_2 = peso de crisol de porcelana con BP seca (g).

m = peso del crisol de porcelana (g).

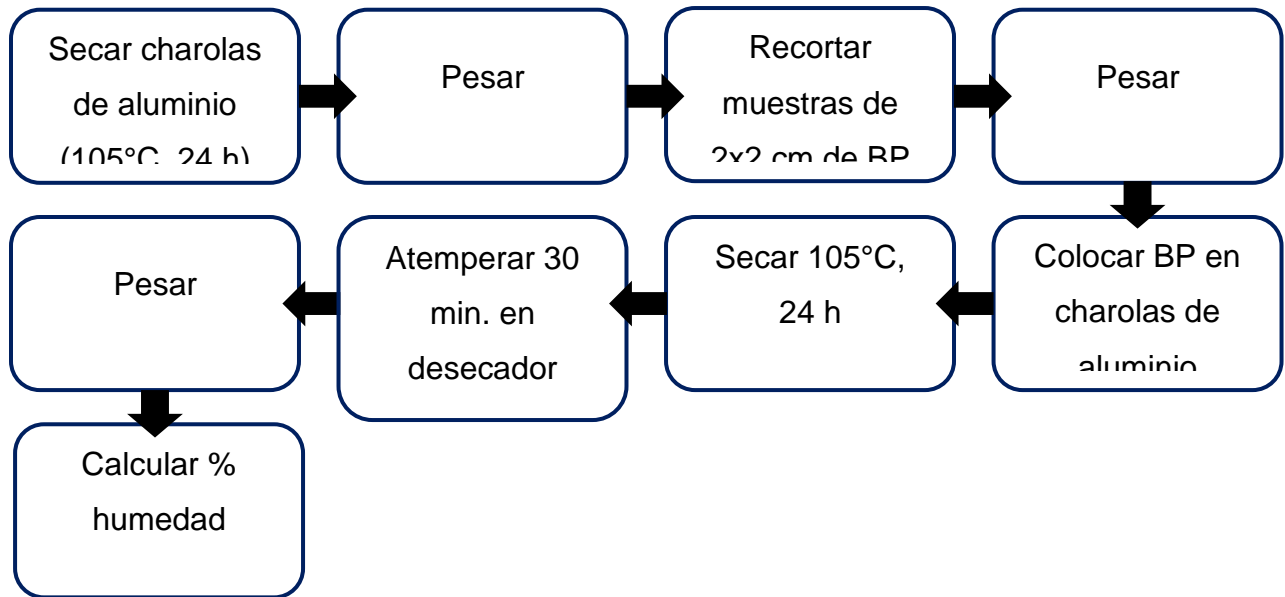


Figura 14. Determinación de humedad.

(I)

(II)



Figura 15. Secado de muestras húmedas (I), Pesado de muestras secas (II).

3.5.3 Solubilidad en agua

La solubilidad en agua se determinó de acuerdo a la metodología descrita por Carrillo (2024) con algunas modificaciones. Las BP fueron cortadas en cuadros de 2x2 cm, se colocaron en charolas de aluminio y se secaron en un horno de secado de aire

forzada a 105°C por 24 h. Las muestras secas se pesaron en una balanza analítica, se colocaron en vasos de plástico con 50 mL de agua destilada y se incubaron por 24 h a 25°C. Trascurrido el tiempo se decantó el agua para recuperar el restante de las biopelículas, las cuales nuevamente se colocaron en charolas de aluminio, se secaron a 105°C por 24 h, se atemperaron 30 min. dentro de un desecador y finalmente se pesaron. La determinación se realizó por quintuplicado. La solubilidad en agua fue calculada en términos de porcentaje de material desintegrado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

P1= Peso inicial de las BP (g)

P2= Peso final de las BP (g)

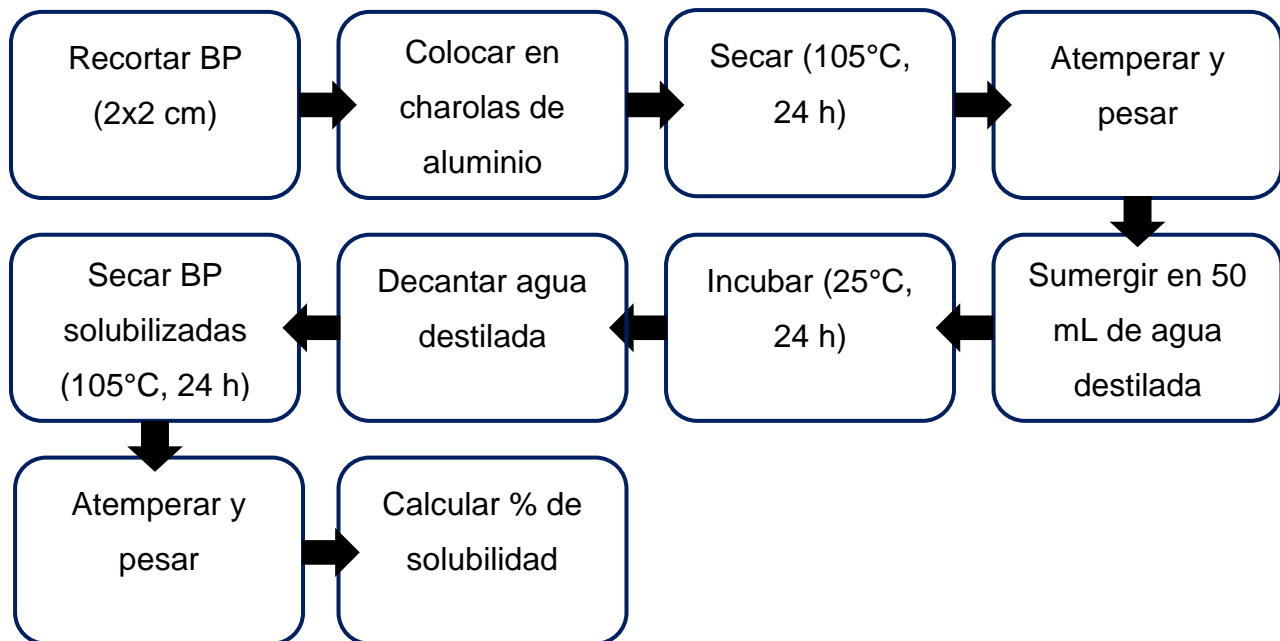


Figura 16. *Determinación de solubilidad en agua.*

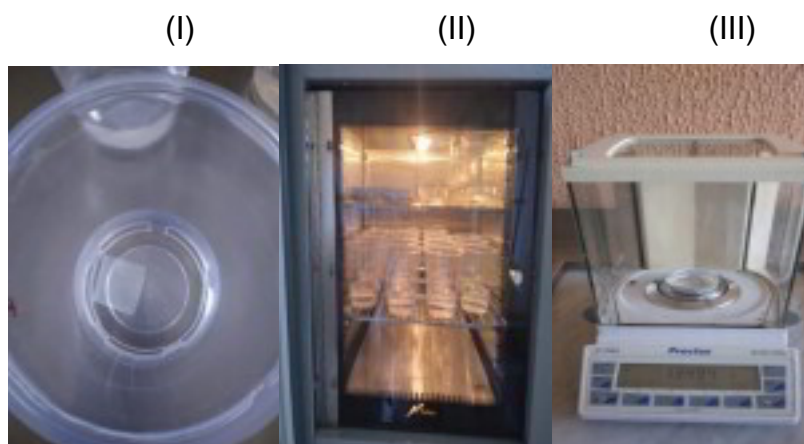


Figura 17. BP sumergida en agua destilada (I), BP incubadas (II), pesado de BP solubilizadas (III).

3.5.4 Color

El color de las BP se evaluó siguiendo la metodología descrita por Caamal *et al.* (2011). Las BP se colocaron sobre un fondo blanco, y se tomaron tres lecturas en diferentes puntos con un colorímetro según la escala CIELAB (L^* , a^* , b^*). La determinación se realizó por quintuplicado para cada tratamiento. Los resultados obtenidos permitieron el cálculo de la diferencia de color mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{0.5}$$

Donde:

ΔE = Diferencia de color

ΔL = L estándar- L muestra

Δa = a estándar – a muestra

Δb = b estándar – b muestra

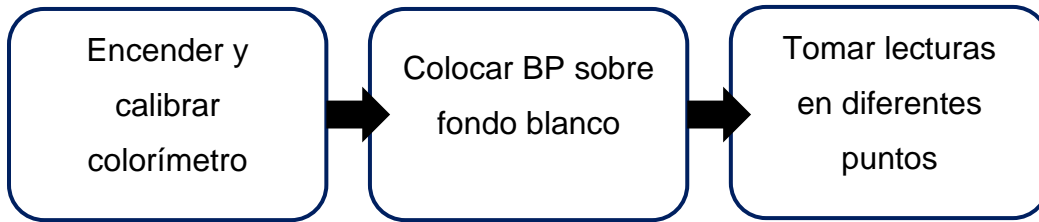


Figura 18. Evaluación del color de las BP.



Figura 19. Lecturas de color de las BP.

3.5.5 Opacidad

La opacidad de las BP se evaluó de acuerdo a la metodología aplicada por Dai *et al.* (2015) con algunas variaciones. Se recortó un fragmento rectangular de biopelícula (1 cm x 4 cm), se colocó en una celda y se llevó a un espectrómetro para valorar su absorbancia a 600 nm. Se utilizó una celda vacía como blanco. Cada tratamiento fue evaluado por quintuplicado y la opacidad se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Opacidad} = \text{Abs} / \delta$$

Donde:

Abs= absorbancia de la BP a 600 nm

δ =espesor de la BP (mm)

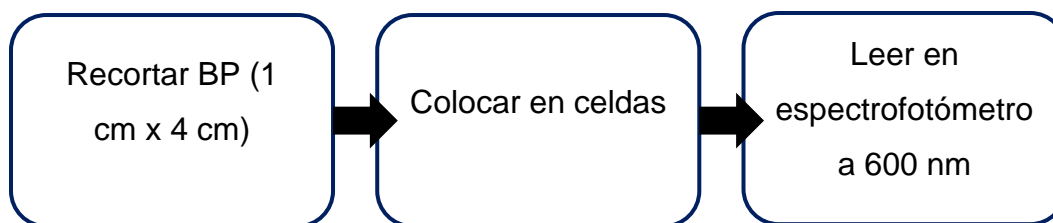


Figura 20. Determinación de la opacidad.

(I)

(II)



Figura 21. Muestras de BP colocadas en celdas (I), lectura de absorbancia de las muestras de BP (II).

3.5.6 Espesor

El espesor se determinó de acuerdo a la metodología aplicada por Oregel *et al.* (2024). Empleando un microméetro digital se tomaron cinco lecturas en diferentes puntos de tres BP seleccionadas al azar por cada tratamiento.



Figura 22. Lectura del espesor de las BP.

3.5.7 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se llevó a cabo utilizando un texturómetro, siguiendo la norma ASTM D882-18, la cual establece un método para determinar las propiedades mecánicas de plásticos transparentes en láminas delgadas, incluidas las BP con un grosor menor a 1 mm (ASTM, 1995). Basándose en la metodología propuesta por Montenegro (2020), con algunas modificaciones, las BP se recortaron en forma rectangular (1 cm de ancho × 7 cm de largo) y se almacenaron en un frasco hermético que contenía bromuro de sodio durante 8 días con el fin de equilibrar las condiciones de humedad. Transcurrido este tiempo, las muestras se colocaron en los soportes de rodillos autoajustables del equipo a una distancia de 40 mm entre las quijadas. El ensayo se ejecutó a una velocidad de desplazamiento de cabezal de 0.50 mm/s hasta que las BP se rompieron. La determinación se realizó por triplicado para cada tratamiento. Los resultados obtenidos permitieron la obtención de los valores de elongación al rompimiento, resistencia a la tensión y el módulo de Young mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Elongación al rompimiento (\%)} = \left(\frac{l_f - l_i}{l_i} \right) * 100$$

$$\text{Resistencia a la tensión } \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F_{max}}{A_0}$$

$$\text{Módulo de Young (\%)} = \frac{\text{Resistencia a la tensión}}{\text{Elongación al rompimiento}} * 100$$

Donde:

l_f = distancia final al romperse la BP

l_i = distancia inicial entre los puños

F_{max} = fuerza máxima requerida para romper la BP

A_0 = área transversal de la BP (ancho x espesor)

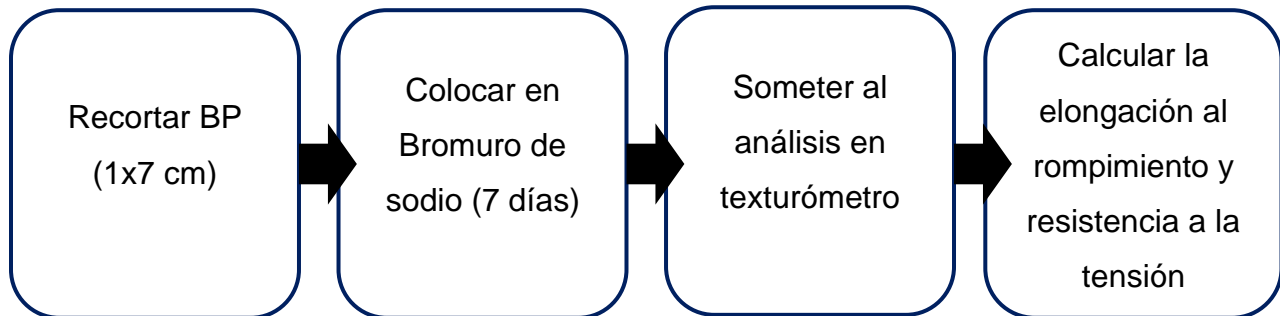


Figura 23. Ensayo de tensión.

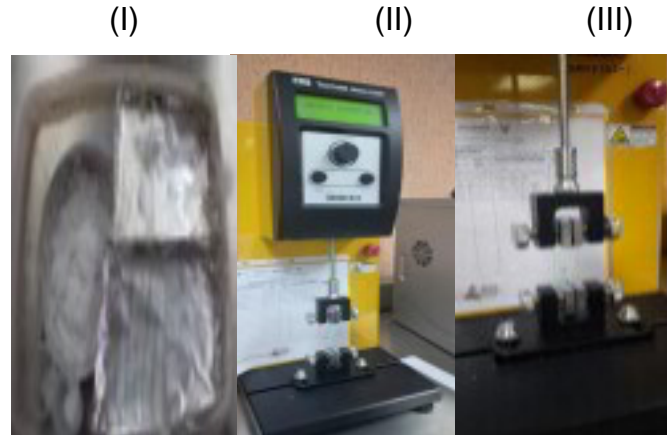


Figura 24. Muestras de BP en NaBr (I), Ensayo de tensión en texturómetro (II) (III).

3.5.8 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se determinó usando una modificación del método ASTM E96-05 (ASTM, 2005). Las BP fueron cortadas en círculos de 6 cm de diámetro y colocadas en celdas de permeabilidad que contenían 1g de cloruro de calcio anhidro como agente higroscópico, se introdujeron en una cámara climática donde se propiciaron las condiciones controladas de 80% de humedad relativa y 35°C de

temperatura. Las celdas se pesaron por 8 h consecutivas en intervalos de 1 h entre cada pesada.

Se determinaron los valores de la velocidad de transmisión de vapor de agua (WVTR) correspondiente a la pendiente de la curva obtenida del análisis de regresión lineal de los datos de ganancia de peso en función del tiempo. Y finalmente, el valor de la permeabilidad al vapor de agua (WVP) se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$WVP = \frac{(slope)(L)(24)}{(A)(VP)}$$

Donde:

Slope= pendiente.

L= espesor de la BP

A= área de permeación de la BP

VP= presión entre el interior y el exterior del sistema

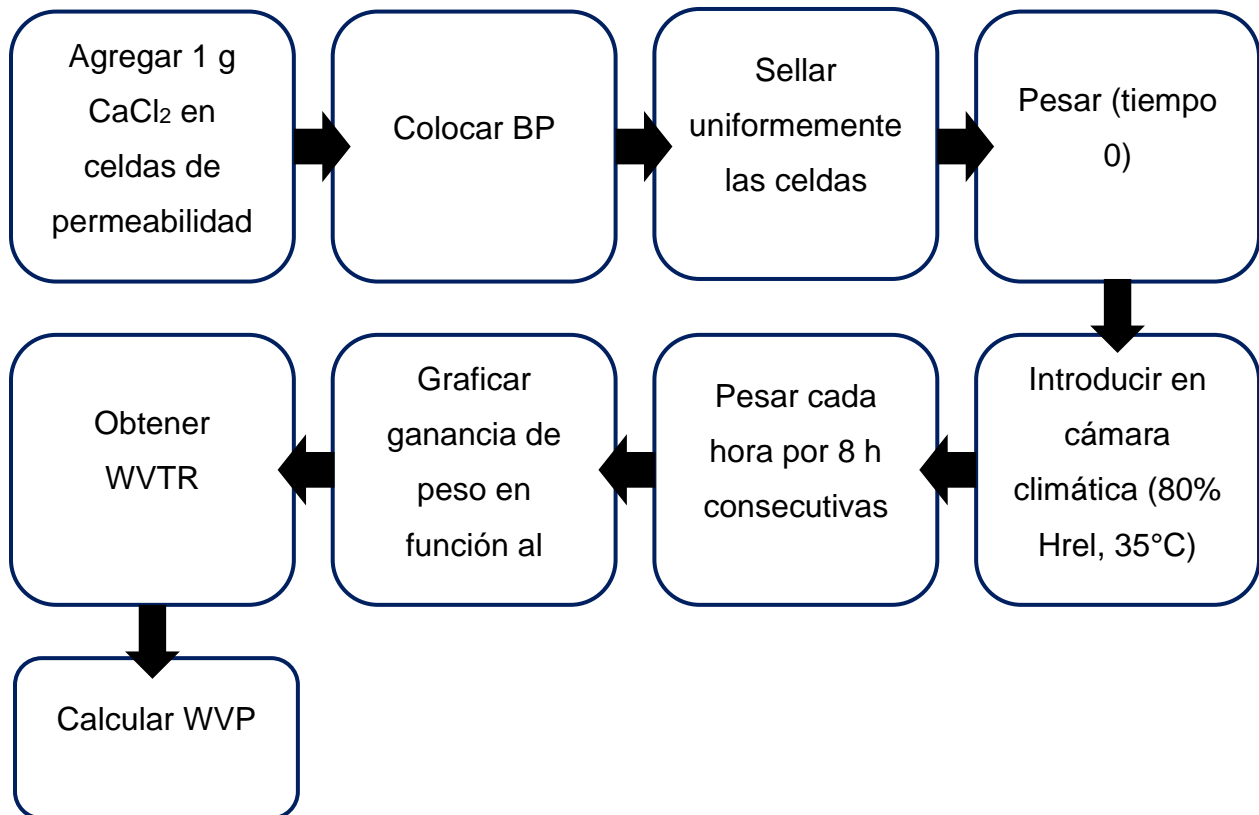


Figura 25. Determinación de permeabilidad al vapor de agua.



Figura 26. Muestras en celdas de permeabilidad (I), muestras en cámara climática (II), pesado de las muestras (III).

3.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis de la composición química por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX)

El análisis de la estructura y composición química de las BP adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, se llevó a cabo en colaboración con el Dr. Eduardo Palacios González, del Instituto Mexicano del Petróleo. Para la obtención de las micrografías, se recortó un pequeño fragmento de las BP, el cual se fijó sobre un portamuestras metálico utilizando cinta de carbono. Posteriormente, se recubrió con una capa muy fina de oro y se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM). Para el análisis de la composición química por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX), se seleccionó un área de aproximadamente 100 x 90 micrómetros de la muestra.

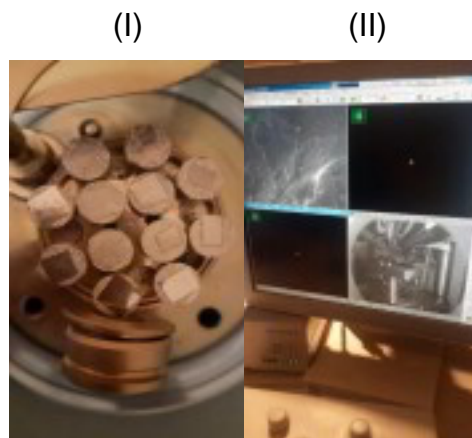


Figura 27. Recubrimiento de las BP con oro (I), Obtención de las micrografías (II).

3.7 Evaluación de propiedades antimicrobianas

La capacidad antimicrobiana de las BP se determinó siguiendo la metodología aplicada por Aguirre *et al.* (2016) con algunas modificaciones. Se utilizaron cepas de *Escherichia coli*, *Salmonella thyphimurium* y *Listeria monocitogenes*. Cada cepa se activó en caldo de soya tripticaseína y se incubó a 35°C por 24 h. Posteriormente, las muestras se centrifugaron para recuperar las células. El pellet se lavó dos veces con solución isotónica (NaCl 0.8%) y se ajustó la concentración del inóculo con el patrón 0.5 de la escala McFarland. Mediante la técnica de difusión en agar métodos estándar, se evaluó la actividad antimicrobiana de las BP.

Para este ensayo, la ampicilina fue el control positivo y la solución isotónica el control negativo, frente a cada bacteria patógena. Las placas se incubaron a 35°C durante 24 h y se evaluaron los halos de inhibición a las 12 y 24 h. Cada ensayo se realizó por triplicado para cada tratamiento.

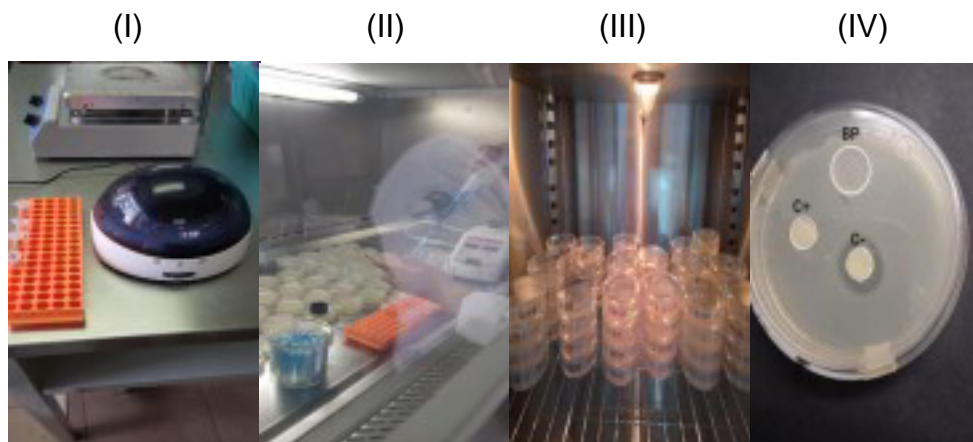


Figura 28. Preparación del inóculo (I), Inoculación (II), Muestras incubadas (III), Identificación de la estructura de las cajas Petri (III).

3.8 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey en el programa estadístico SAS versión 9. El nivel de confianza para los análisis estadísticos fue del 95% ($P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación cualitativa de las BP en el diseño de mezclas se presenta en la Tabla 7, el cual reveló que las formulaciones 1, 3 y 5 presentaron resultados negativos en los tres parámetros analizados. Por su parte, las formulaciones 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 presentaron resultados desfavorables en cuanto a la manejabilidad y continuidad, sin embargo, fueron homogéneas. En contraste, los tratamientos 2 y 6 destacaron positivamente en los tres aspectos evaluados, ya que las BP resultaron manipulables, estructuralmente intactas y homogéneas.

Tabla 7. Evaluación cualitativa del diseño de mezclas

F	Almidón (%)	Glicerol (%)	Manejabilidad	Continuidad	Homogeneidad
1	2	1	No	No	No
2	4	1	Si	Si	Si
3	2	1.71	No	No	No
4	4	1.71	No	No	Si
5	1.5857	1.3550	No	No	No
6	4.4142	1.3550	Si	Si	Si
7	3	0.8529	No	No	Si
8	3	1.8570	No	No	Si
9	3	1.3550	No	No	Si
10	3	1.3550	No	No	Si
11	3	1.3550	No	No	Si
12	3	1.3550	No	No	Si
13	3	1.3550	No	No	Si

La concentración de los componentes en una formulación filmogénica es un parámetro muy importante que influye en gran medida en el proceso de formación de las BP y en sus propiedades finales, incluidas las cualitativas. Según Bonivento & Berrocal (2011), las características de una película son el resultado del tipo, composición química y conformación estructural de las biomoléculas y demás componentes que la integran.

El almidón es el responsable de la formación de las BP, Fernández (2004) explica que dicho proceso depende de una serie de transformaciones físicas y químicas que este biopolímero experimenta al ser sometido a procesos de calentamiento y enfriamiento. Durante la gelatinización, los gránulos de almidón se rompen de manera irreversible, liberando sus moléculas, las cuales, al reorganizarse, forman una red tridimensional que da lugar a la estructura de la película como tal.

Por su parte, el glicerol como plastificante, tiene un efecto importante sobre las características de las BP debido a las interacciones químicas que establece con el almidón. En ausencia de glicerol, las BP tienen propiedades muy diferentes. Duarte (2017) respalda esta información en su investigación, donde desarrolló BP utilizando diferentes concentraciones de almidón de yuca y glicerol. Inicialmente, preparó una solución madre con un 5% p/p de almidón de yuca y un 10% p/p de glicerol en relación con el peso total de la solución. Posteriormente, experimentó con diversas concentraciones de ambos componentes, demostrando que existe una relación directa entre la cantidad de almidón y glicerol empleados y las propiedades de las BP.

Estos principios explican los resultados obtenidos en la evaluación cualitativa de este trabajo. Las formulaciones 1, 3 y 5, donde se emplearon las concentraciones más bajas de almidón, junto con las formulaciones 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13, con una concentración intermedia de almidón, no lograron desarrollar una matriz polimérica lo suficientemente estable para garantizar características cualitativas favorables en las BP. En contraste, la formulación 2 y 6, donde se incorporó la máxima concentración de almidón, promovió exitosamente la formación de las BP con características cualitativas óptimas. Respecto a la concentración de glicerol, se identificó que una concentración intermedia interactuó de manera más eficiente con la matriz polimérica.

Estos hallazgos cualitativos se complementan con los resultados cuantitativos de elongación al rompimiento y resistencia a la tensión que se presentan en la Tabla 8. Se destaca, con un marco rojo, la formulación 6, la cual resultó ser la óptima al aplicar el diseño de superficie de respuesta. La formulación 6 no presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) en cuanto a la elongación al rompimiento en comparación con las formulaciones 2, 4 y 7; sin embargo, destacó por alcanzar el porcentaje más alto, lo que indicó una

mayor flexibilidad. De manera similar, no hubo diferencias significativas ($P < 0.05$) en términos de resistencia a la tensión con respecto a la formulación 2, lo que indicó que dichas BP mostraron una capacidad superior para resistir esfuerzos sin deformarse ni romperse.

Tabla 8. Diseño de mezclas y resultados de elongación al rompimiento y resistencia a la tensión

F	Variables independientes		Variables dependientes	
	Almidón (%)	Glicerol (%)	Elongación al rompimiento (%)	Resistencia a la tensión (%)
1	2	1	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f
2	4	1	18.82±3.58 ^{ab}	0.62±0.06 ^a
3	2	1.71	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f
4	4	1.71	13.05±4.09 ^{abcd}	0.25±0.04 ^c
5	1.5857	1.355	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f
6	4.4142	1.355	20.78±3.27 ^a	0.60±0.05 ^a
7	3	0.8529	17.32±6.81 ^{abc}	0.40±0.05 ^b
8	3	1.857	7.67±0.38 ^{de}	0.06±0.00 ^{ef}
9	3	1.355	10.82±1.13 ^{bcd}	0.17±0.02 ^{cd}
10	3	1.355	7.62±2.34 ^{de}	0.14±0.04 ^{de}
11	3	1.355	8.29±1.12 ^d	0.15±0.02 ^{de}
12	3	1.355	9.85±1.13 ^{cd}	0.20±0.02 ^{cd}
13	3	1.355	11.57±0.28 ^{bcd}	0.19±0.01 ^{cd}

Literales diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Solano *et al.* (2018) menciona que las propiedades mecánicas como la elongación al rompimiento y la resistencia a la tensión dependen directamente de la formulación de las BP. En este contexto, la formulación 6, que contenía la mayor concentración de almidón y una concentración intermedia de glicerol, alcanzó una elongación al rompimiento del 20.78%, superando a las demás formulaciones en esta propiedad. El almidón, al formar una red tridimensional, constituye la estructura principal de las BP, sin

embargo, esta estructura puede ser rígida, debido a ello se emplean los plastificantes. Ghasemlou *et al.* (2011) explican que el glicerol, interactúa con los grupos hidroxilo del almidón mediante enlaces de hidrógeno, disminuyendo las fuerzas intermoleculares y aumentando la movilidad de las cadenas poliméricas, mejorando así las propiedades mecánicas de las BP. Otey & Westhoff (1979) reafirman que los plastificantes solubles en agua como el glicerol, actúan como agentes suavizantes para los almidones, mejorando la flexibilidad de las biopelículas resultantes.

En el caso de la formulación óptima se logró una sinergia entre ambos componentes por ello las BP resultaron con una excelente flexibilidad. Una concentración excesiva de glicerol puede debilitar la BP tal y como ocurrió en las formulaciones 3, 4 y 8 donde la elongación al rompimiento fue de 0%, 13.05% y 7.67% respectivamente, mientras que una concentración insuficiente no es efectiva para plastificar efectivamente el almidón, como ocurrió en las formulaciones 1, 2 y 7, donde la elongación al rompimiento fue de 0%, 18.82% y 17.32% respectivamente. Jouki *et al.* (2013) respaldan estos hechos, en un estudio elaboraron una película hidrocoloide comestible a partir de semillas de berro, plastificada con diferentes concentraciones de glicerol. Sus resultados demostraron una mejora en la flexibilidad de las películas, es decir, una mayor elongación al rompimiento.

En cuanto a la resistencia a la tensión, se observó la misma tendencia. Los valores más altos se presentaron en las formulaciones 2 y 6, con 0.62% y 0.60%, respectivamente. Estas formulaciones se caracterizaron por tener un alto contenido de almidón combinado con concentraciones bajas e intermedias de glicerol. En contraste, en las formulaciones 4 y 8, con elevadas concentraciones de almidón y glicerol, la tensión disminuyó, registrando valores de 0.25% y 0.06%, respectivamente. Estos resultados indicaron que una alta concentración de almidón, acompañada de una reducción en el contenido de glicerol, permitió que las BP soportaran mejor la fuerza aplicada en la tensión antes de fracturarse. Muscat *et al.* (2012) corrobora estos resultados en una investigación donde estudió exhaustivamente el efecto del uso de glicerol y xilitol como plastificantes en las propiedades mecánicas y de barrera de vapor de agua de películas plastificadas a base de almidón con alto y bajo contenido de amilosa, encontrando que

aumentó la resistencia a la tensión con la disminución de las concentraciones de los plastificantes por debajo del 15 % en base sólida seca, independientemente del tipo de almidón.

Las biopelículas de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ en concentraciones de 0, 50, 100 y 150 ppm se muestran en la figura 29.

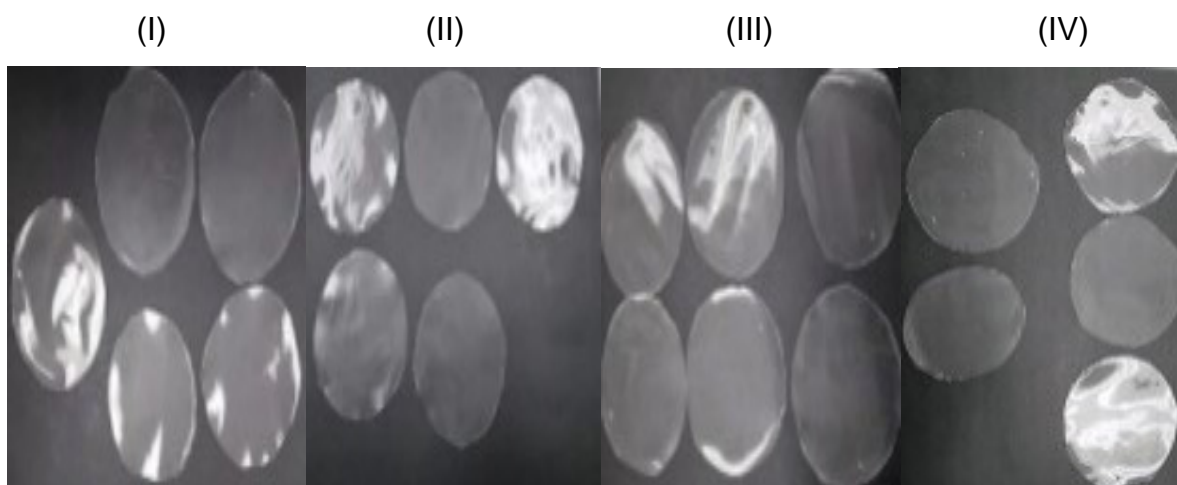


Figura 29. BP adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ T0 (I), T50 (II), T100 (III), T150 (IV).

Los resultados de la evaluación cualitativa, presentados en la Tabla 9, fueron homogéneos para los cuatro tratamientos, indicando que las BP resultaron manejables, continuas y homogéneas. Esto sugiere que la adición de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ no generó cambios en estas propiedades cualitativas.

Tabla 9. Evaluación cualitativa de las BP adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$

T	Manejabilidad	Continuidad	Homogeneidad
0	Si	Si	Si
50	Si	Si	Si
100	Si	Si	Si
150	Si	Si	Si

Por otro lado, la Tabla 10 muestra los resultados obtenidos en cuanto a humedad, solubilidad y espesor. El porcentaje de humedad mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los cuatro tratamientos, observándose una tendencia ascendente a medida que aumentó la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, lo que indicó un mayor contenido

de humedad en las BP con NP añadidas. En cuanto a la solubilidad en agua, los tratamientos 100 y 150 presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en comparación con el tratamiento 0, mostrando una tendencia descendente en función de la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, lo que implicó un menor porcentaje de solubilidad. Respecto al espesor, los resultados fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) en los tratamientos 50 y 150, aunque no se encontraron diferencias significativas al compararlos con el tratamiento 0, por lo cual las $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ no mostraron un efecto consistente en esta propiedad.

Tabla 10. Resultados de humedad, solubilidad y espesor de las BP adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$

T	Humedad (%)	Solubilidad (%)	Espesor(mm)
0	17.58±1.61 ^d	74.21±1.61 ^a	0.15±0.01 ^{ab}
50	22.28±0.66 ^c	67.75±0.66 ^{ab}	0.15±0.01 ^b
100	26.98±2.28 ^b	59.57±2.28 ^b	0.16±0.01 ^{ab}
150	30.12±0.97 ^a	22.89±0.97 ^c	0.16±0.01 ^a

Literales diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La incorporación de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ a la formulación aumentó significativamente ($p < 0.05$) el contenido de humedad, pasando del 17.58% en el testigo al 30.12% en el tratamiento con 150 ppm de NP, esto debido al carácter hidrofílico de las componentes. Oropeza *et al.* (2016) expone que el almidón cuenta con una gran cantidad de grupos hidroxilo (OH^{-1}) en su estructura, lo que le confiere una elevada hidrofiliidad. Ceron (2013) explica que el almidón tiene la capacidad de ligar y retener moléculas de agua en su estructura a través de fuertes interacciones de enlaces de hidrógeno. Por otro lado, el glicerol actúa como un agente adicional que también capta agua gracias a las interacciones de hidrógeno promovidas por sus propios grupos hidroxilo, cabe mencionar que cuando su interacción es relativamente débil con el almidón genera sitios adicionales para la adsorción de agua. Arrieta & Palencia (2016) hacen mención de este hecho explicando que la incorporación del plastificante modifica las interacciones moleculares entre las cadenas poliméricas del almidón, aumentando su movilidad y flexibilidad, lo que

facilita la vibración de los grupos hidroxilo y mejora la capacidad para retener agua (Arrieta & Palencia, 2016).

Siqueira (2011) explica que el hidróxido de calcio es una sustancia que en presencia de agua se disocia en iones calcio (Ca^{2+}) e hidroxilo (OH^-), un proceso que ocurrió durante la elaboración de la BP y que permitió la interacción de este compuesto no solo con agua, sino que también con el almidón de jícama y glicerol. Esta disociación es clave para explicar las modificaciones en las propiedades de las BP. Los iones OH^- , altamente polares, tienen la capacidad de formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua, además al estar en contacto con los grupos OH^- del almidón y el glicerol, generan nuevas interacciones que aumentan la flexibilidad de las cadenas poliméricas y proporcionan sitios adicionales para la adsorción de agua. Por otro lado, los iones Ca^{2+} , presentan alta afinidad por el agua, forman capas de hidratación y establecen interacciones con los grupos OH^- del almidón y el glicerol, funcionando como agentes de reticulación parcial que refuerzan la cohesión estructural de las BP. De igual manera es importante destacar que el hidróxido de calcio es de naturaleza higroscópica, lo que significa que tiende a absorber humedad del ambiente. Por lo tanto, durante la manipulación de las BP, estas también pudieron haber absorbido humedad adicional.

Esta misma tendencia se presentó en un trabajo realizado por Do Nascimento *et al.* (2024) donde elaboró películas a base de almidón de maíz y pectina adicionadas con nanopartículas de óxido de zinc (ZnONP). En dicho trabajo, al igual que en este caso, los componentes de la formulación fueron de carácter hidrofílico. Y los resultados mostraron que las ZnONP no influyeron en la afinidad al agua de las BP, es decir, no hubo una reducción de los valores de humedad al agregar las ZnONP.

La incorporación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -NP a la formulación redujo significativamente ($p < 0.05$) la solubilidad en agua, disminuyendo de 74.21% en el tratamiento testigo a 22.89% en el tratamiento con 150 ppm de NP. Estos resultados muestran que las BP adicionadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -NP presentan una mayor resistencia a la disolución en contacto con el agua, con un efecto más pronunciado al aumentar la concentración. Este comportamiento podría explicarse por la formación de una matriz más cohesiva y densa, que dificulta la disolución de las BP.

Además, el Ca(OH)_2 se caracteriza por su baja solubilidad en agua. Asimismo, al estar en contacto con CO_2 presente en la atmósfera, como ocurrió durante la manipulación de las BP, reacciona generando CaCO_3 un compuesto prácticamente insoluble en agua, lo que refuerza aún más la disminución de la solubilidad (Harish et al., 2020).

Resultados similares fueron reportados por Limón-Valenzuela *et al.* (2022), quienes estudiaron el efecto de las nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO_3 -NP) y plastificantes (sorbitol-glicerol) en películas de almidón de maíz, producidas mediante tecnologías combinadas de extrusión y casting para mejorar las propiedades mecánicas y de barrera. Obtuvieron valores de solubilidad que oscilaron entre 23.97% y 43.48%, empleando una concentración de 0-1% de NP. De manera similar, Castro *et al.* (2024) respaldan estos resultados en un estudio en el que elaboraron películas con almidón de maíz adicionadas con 0-2% de CaCO_3 -NP y aceite de citronela, obteniendo valores de solubilidad que fluctuaron entre 10.30% y 35.84%. En comparación con los resultados obtenidos en el presente estudio que variaron entre 22.89% y 67.75%, empleando una concentración más baja de 0.005% a 0.0150% (haciendo la conversión de las unidades), se corrobora que, a mayor concentración de NP, menor solubilidad de las BP.

En cuanto al espesor, los resultados pasaron de 0.15 mm en el tratamiento testigo a 0.16 mm en el tratamiento con 150 ppm de NP. Esto sugiere que las Ca(OH)_2 -NP no mostraron un efecto significativo ni consistente en esta propiedad. Este comportamiento se puede atribuir principalmente al uso de la misma cantidad de solución filmogénica en las cajas Petri (Sifuentes, 2011).

Limón-Valenzuela *et al.* (2022) y Castro *et al.* (2024), en los trabajos descritos anteriormente, reportaron valores de espesor de 0.053 y 0.050 mm, respectivamente, y no destacaron la influencia de las CaCO_3 -NP sobre este parámetro. Estos valores fueron menores en comparación con los que se obtuvieron en el presente estudio, donde se emplearon 30 ml de solución filmogénica, mientras que los autores mencionados utilizaron solo 25 ml. Esto demuestra que la cantidad de solución filmogénica utilizada en la formación de las BP, desempeña un papel determinante. Por otro lado, Anchundia *et al.* (2016) exponen que el espesor de la mayoría de las BP de naturaleza hidrofílica es

similar, reportando valores en el rango de 0.11 a 0.17 mm en películas elaboradas con almidón de cáscara de plátano. Los valores obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro de este intervalo, lo que refuerza la consistencia de los resultados obtenidos con películas de características similares.

Los resultados de color y opacidad se presentan en la Tabla 11. En primer lugar, los valores de L^* fueron positivos y cercanos a 100, lo que indicó tonalidades blancas. Los tratamientos 50, 100 y 150 fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) en comparación con el tratamiento 0. Por otro lado, los valores de a^* también fueron positivos, reflejando tonalidades rojizas; en este caso, el tratamiento 150 presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) frente a los tratamientos 0 y 50. En cuanto a los valores de b^* , estos fueron negativos, lo que indicó tonalidades azules. Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los cuatro tratamientos. Respecto a los resultados de ΔE , las variaciones en el color fueron significativas ($p < 0.05$) en los tratamientos 50, 100 y 150 al compararlos con el tratamiento 0. Finalmente, los resultados de opacidad presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el tratamiento 150 comparado con los tratamientos 0, 50 y 100.

Tabla 11. Resultados de color y opacidad de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$

T	L^*	a^*	b^*	ΔE	Opacidad (mm^{-1})
0	95.20±0.33 ^a	1.07±0.06 ^b	-3.00±0.08 ^a	1.54±0.30 ^a	0.34±0.01 ^c
50	94.85±0.34 ^b	1.10±0.04 ^b	-3.09±0.09 ^a	1.22±0.28 ^b	0.38±0.02 ^{bc}
100	94.74±0.27 ^{bc}	1.11±0.06 ^{ab}	-2.94±0.08 ^a	1.18±0.22 ^b	0.41±0.01 ^b
150	94.50±0.39 ^c	1.15±0.03 ^a	-2.88±0.42 ^a	1.14±0.26 ^b	0.46±0.03 ^a

Literales diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Al aumentar la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, se observó una disminución en la luminosidad (L^*), pasando de 95.20 a 94.50. Paralelamente, a^* aumentó pasando de 1.07 a 1.15, lo cual indicó un ligero desplazamiento hacia tonalidades más rojizas. Por otro lado, b^* disminuyó de -3.09 a -2.88, mostrando una tendencia hacia tonos menos azulados. A pesar de estos cambios, el valor de ΔE , que cuantifica la diferencia de color

total, indicó que las variaciones cromáticas entre los tratamientos apenas perceptibles al ojo humano, como se aprecia en la Figura 30.

Estos resultados sugieren que las $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ influyeron en las propiedades ópticas de las BP. La disminución en L^* puede atribuirse a una mayor absorción de luz visible por parte de las NP. La variación en las coordenadas de color a^* y b^* sugiere una interacción preferencial de las NP con ciertas longitudes de onda de la luz visible. Estos resultados son consistentes con lo obtenido por Castillo *et al.* (2014), quienes reportaron cambios similares en los parámetros de color L^* , a^* y b^* al incorporar nanopartículas de taro (TNP) en películas de almidón termoplástico. Martínez *et al.* (2024) explicaron que el uso de consolidantes basados en $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ pueden inducir cambios de color en los materiales en los cuales se emplea, lo cual se atribuye a las interacciones entre las NP y la estructura del material, alterando así sus propiedades ópticas.

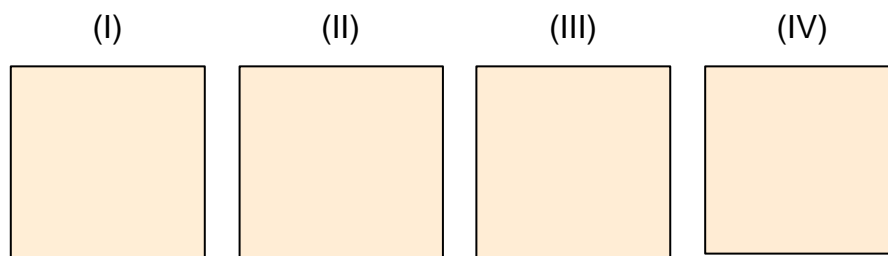


Figura 30. Color de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ T0 (I), T50 (II), T100 (III), T150 (IV).

La opacidad de las BP mostró un aumento directamente relacionado con la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$. Los valores aumentaron significativamente ($p < 0.05$) de 0.34 mm^{-1} en el tratamiento testigo a 0.46 mm^{-1} en el tratamiento con 150 ppm de NP. Este incremento puede atribuirse a la incrustación e integración de las NP en los espacios intermedios de la matriz polimérica, lo que impidió la transmisión de la luz y condujo a una mayor opacidad. Además, la aglomeración de las NP podría haber generado áreas con mayor densidad que reforzaron la dispersión de la luz. Estas observaciones coinciden con estudios previos que reportan un comportamiento similar en materiales compuestos reforzados con NP. Sun *et al.* (2014) reportaron que en películas nanocompuestas basadas en almidón de maíz con concentraciones de 0.02% a 0.5% de $\text{CaCO}_3\text{-NP}$, la opacidad aumentó significativamente de 1.29 a 2.23 mm^{-1} con el aumento

de la concentración de NP. De manera similar, Dai *et al.* (2015) observaron que la incorporación de nanopartículas de taro (TSNP) en películas de almidón de maíz, a concentraciones del 2 % al 15 %, elevó significativamente la opacidad de 1.15 a 2.98 mm^{-1} . Por su parte, Estudillo *et al.* (2023) evaluaron películas basadas en proteína de guandul, goma de semilla de tamarindo y nanopartículas de plata (AgNPs) reportando un aumento en la opacidad de 4.15 mm^{-1} en el control a 6.54 mm^{-1} en las películas con NP. No obstante, los valores obtenidos en el presente estudio fueron significativamente menores, lo que indica que las BP de almidón de jícama adicionadas con Ca(OH)_2 -NP son más transparentes, una característica favorable para su aplicación en alimentos que buscan mejorar su apariencia visual.

Los resultados de resistencia a la tensión, elongación al rompimiento y módulo de Young se muestran en la Tabla 12. En los tres parámetros se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en los tratamientos 0, 50 y 100 comparados con el tratamiento 150.

Tabla 12. Resultados de resistencia a la tensión, elongación y módulo de Young de las BP adicionadas con Ca(OH)_2 -NP

T	Resistencia a la tensión (MPa)	Elongación al rompimiento (%)	Módulo de Young (MPa)
0	2.32±0.17 ^a	6.68±0.99 ^b	35.47±7.56 ^a
50	2.67±0.24 ^a	5.47±0.34 ^b	48.99±5.21 ^a
100	2.29±0.09 ^a	6.17±0.73 ^b	37.66±5.86 ^a
150	1.74±0.14 ^b	21.96±10.24 ^a	10.20±7.31 ^b

Literales diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos demuestran la influencia de la concentración de Ca(OH)_2 -NP en las propiedades mecánicas de las BP. La resistencia a la tensión alcanzó un valor máximo de 2.67 MPa en el tratamiento con 50 ppm, disminuyendo a 1.74 MPa en el tratamiento con 150 ppm. De manera similar el módulo de Young, presentó un valor máximo de 48.99 Pa en el tratamiento con 50 ppm, disminuyendo a 10.20 Pa en el tratamiento con 150 ppm.

Los valores de resistencia la tensión y módulo de Young pueden atribuirse principalmente al estado de dispersión de las NP y a su interacción con los segmentos de la cadena de almidón, lo que redujo la movilidad de la cadena polimérica y la rigidez macroscópica. Esta tendencia es coherente con lo reportado por Sun *et al.* (2014), quienes observaron que las propiedades mecánicas de las películas de almidón de maíz reforzadas con CaCO₃-NP alcanzaron valores máximos de 2.24 y 2.41 Mpa en cuanto a resistencia a la tensión y módulo de Young, respectivamente, a una concentración de 0.06%. No obstante, al aumentar la concentración a 0.5%, estos valores disminuyeron a 1.83 y 1.84 Mpa, respectivamente.

Por el contrario, la elongación al rompimiento mostró un comportamiento opuesto, alcanzando un mínimo de 5.47% en el tratamiento con 50 ppm y aumentando a 21.96% en el tratamiento con 150 ppm. Este aumento puede atribuir al efecto plastificante del glicerol y las NP, en este último especialmente cuando las concentraciones son más altas (Limón-Valenzuela et al. 2022). Un resultado similar se presentó en un estudio realizado por Sarma *et al.* (2024) donde desarrollaron una película a base de almidón de arroz plastificado con glicerol y agar, incorporado con un extracto mixto de hojas de *Ocimum tenuiflorum* y *Murraya koenigii*, junto con nanopartículas de plata (AgNP) sintetizadas de manera ecológica a una concentración de 1 mM. Los resultados mostraron que la película con AgNP presentó la mayor elongación al rompimiento, alcanzando un valor de 56.8 %.

Los resultados de estas propiedades mecánicas comparadas con los de almidón de maíz y papa nanoestructurados, se presentan en la Figura 31. Se observa que la resistencia a la tensión de las BP de almidón de jícama es similar a la de maíz y papa, lo que sugiere una resistencia competitiva comparada con almidones convencionales. Sin embargo, la elongación al rompimiento resulta menor en las BP de almidón de jícama, lo que indica una menor flexibilidad en comparación con las de maíz y papa. En cuanto al módulo de Young, las BP de almidón de jícama presentan un valor superior al de las BP de maíz y papa, lo que sugiere una mayor rigidez.

Es importante señalar que los valores reportados por González *et al.* (2016) y Sun *et al.* (2014) emplean concentraciones de NP mayores a las utilizadas en este estudio, lo que

podría influir en la comparación directa de los resultados. No obstante, en términos generales, las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ exhibieron una combinación de propiedades mecánicas que las caracterizaron como resistentes, poco flexibles y rígidas. Esta combinación es relevante para aplicaciones donde se requiera durabilidad, protección y soporte estructural. Sin embargo, no es tan viable en aplicaciones que exigen mayor adaptabilidad y capacidad de deformación.

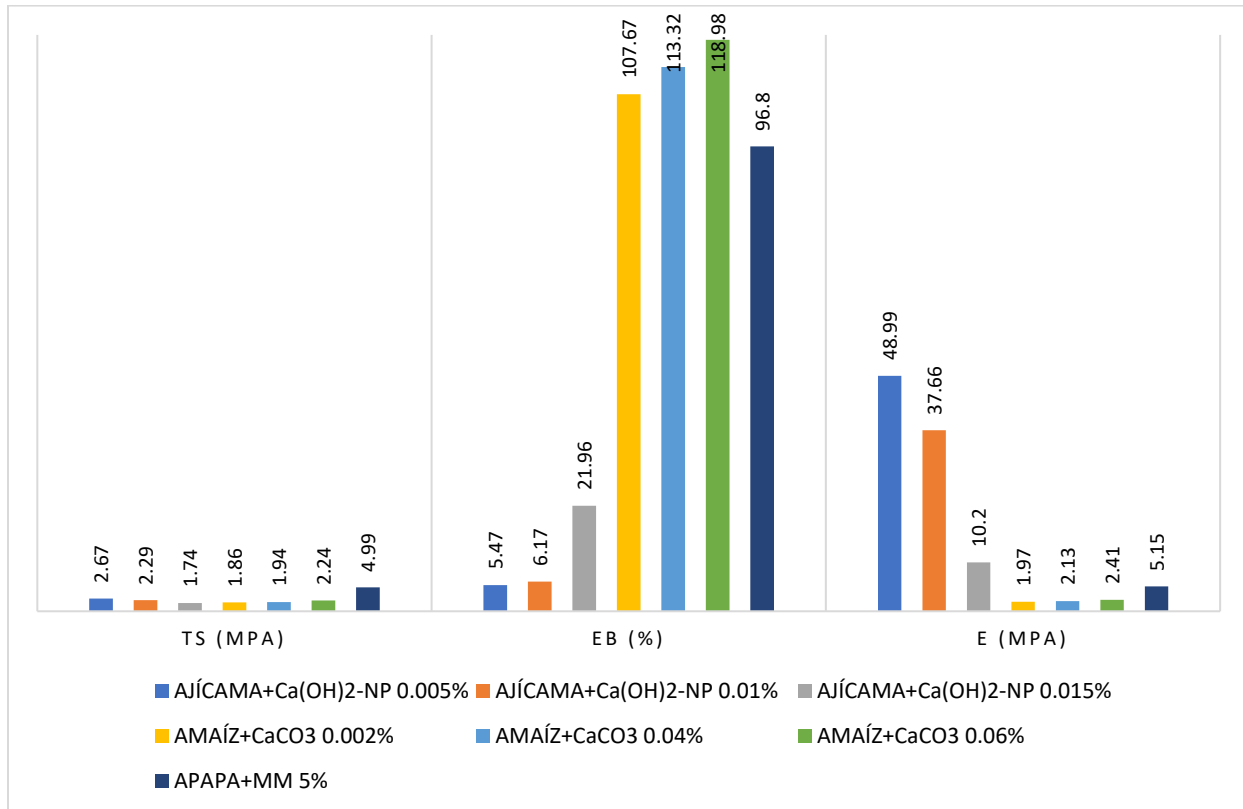


Figura 31. Comparación de TS, EB y E de BP de almidón de jícama, maíz y papa. (González et al., 2016.; Sun et al., 2014)

Los resultados de WVP se presentan en la Figura 32, se observa que los cuatro tratamientos (0, 50, 100 y 150) no presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$).

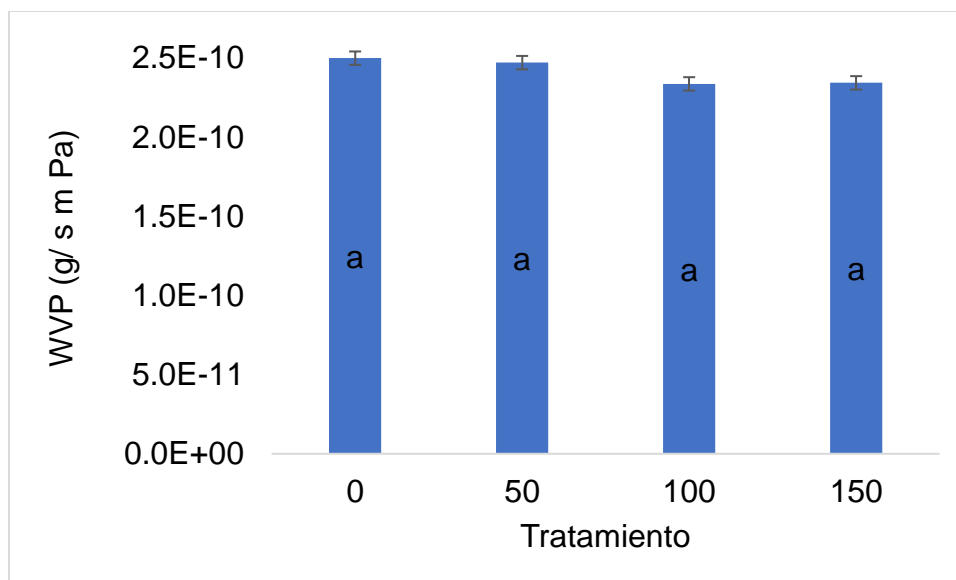


Figura 32. Resultados de WVP de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$.

Estos resultados indicaron que la adición de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ no tuvo un efecto notable en la WVP. Esto podría atribuirse a que la concentración de NP utilizada no fue suficiente para formar una red continua hidrofóbica capaz de bloquear el paso del vapor de agua. Se observó una ligera disminución en los valores de WVP, pasando de 2.50×10^{-10} g/s·m·Pa en el tratamiento testigo a 2.34×10^{-10} g/s·m·Pa en los tratamientos con 100 y 150 ppm, lo que sugiere que concentraciones más elevadas podrían generar un efecto más consistente. Este resultado concuerda con lo reportado por Castillo *et al.* (2014), quienes encontraron que la incorporación de 1% p/p de TNP en películas de almidón termoplástico no afectó significativamente los valores de WVP. Sin embargo, a concentraciones mayores a 3 % p/p, se redujo aproximadamente un 27%.

La Tabla 13 muestra los valores de WVP de las BP elaboradas con diferentes polisacáridos y nanomateriales. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el presente estudio, se observó que la WVP fue elevada, al igual que en las BP formuladas con polisacárido de soja y nanocelulosa.

Tabla 13. WVP películas nanocompuestos

Formulación	WVP (g/s·m·Pa)	Referencia
Almidón de maíz+CaCO ₃ -NP (extrusión-casting)	0.87-3.39 x 10 ⁻¹¹	(Limón-Valenzuela <i>et al.</i> , 2022)
Almidón de maíz+CaCO ₃ -NP (0.06%)	1.58 x 10 ⁻¹⁰	(Sun <i>et al.</i> , 2014)
Almidón de maíz+CaCO ₃ -NP+AC (0.02%-0.5%)	1.01-8.90 x 10 ⁻¹¹	(Castro <i>et al.</i> , 2024)
Glucomanano de konjac+quitosano+nano- ZnO+antocianinas	3.29 x 10 ⁻¹¹	(Sun <i>et al.</i> , 2020)
Almidón de yuca+nanocristales de almidón.	5.00 x 10 ⁻¹¹	(Dai <i>et al.</i> , 2020)
Pectina+nanopartículas de lignina	1.24 x 10 ⁻¹⁰	(Zhang <i>et al.</i> , 2023)
Polisacárido de soja+nanocelulosa	2.59 x 10 ⁻¹⁰	(Cao <i>et al.</i> , 2024)

Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza de los componentes de la BP. Las Ca(OH)₂-NP son de carácter hidrofílico moderado, lo que podría influir en el aumento de la WVP. Sun *et al.* (2014) observaron una disminución de la WVP al utilizar CaCO₃-NP en películas de almidón de maíz, lo que atribuyeron, en parte, a que estas NP son menos hidrofílicas que el almidón. De manera similar, la presencia de glicerol en la formulación puede incrementar la WVP debido a su naturaleza hidrofílica, ya que forma fácilmente puentes de hidrógeno con las moléculas de agua (Enríquez *et al.*, 2012). Se ha reportado que las BP a base de almidón tienden a presentar una WVP elevada, fenómeno que algunos estudios han relacionado con la cantidad de amilosa presente. En general las BP de almidón con alto contenido de amilosa presentan menor WVP que aquellas con menor contenido de amilosa, debido a la fuerte interacción intermolecular que se forma (Oropeza *et al.*, 2016). En este contexto, la Tabla 13 muestra que las formulaciones que incluyeron almidón de maíz y yuca registraron valores más bajos de

WVP. Ambos materiales contienen una mayor proporción de amilosa en comparación con el almidón de jícama, cuyo contenido fue determinado en este estudio. Esta relación se puede visualizar claramente en la Tabla 14.

Tabla 14. Contenido de amilosa almidón de jícama, maíz y yuca.

Fuente	% amilosa
Jicama	15.3059
Maíz	20.59-32.86
Yuca	30.63

% de amilosa en almidón de maíz y yuca obtenidos de Agama *et al.* (2013) y Meaño *et al.* (2014).

Por otro lado, las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), presentadas en la Figura 33, evidencian el efecto de la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-NP}$ en la morfología superficial de las BP de almidón de jícama.

En el tratamiento con 0 ppm de NP, las micrografías (a, b y c) muestran matrices relativamente continuas, aunque con la presencia de algunas depresiones o cavidades grandes distribuidas de forma aleatoria. Esta morfología superficial podría atribuirse a la formación de tensiones internas generadas durante el proceso de secado. El método de "casting" utilizado para formar las BP implica un proceso de evaporación del agua mediante la aplicación de calor, lo que reduce el contenido de humedad y favorece la formación de una estructura con las características adecuadas. Sin embargo, tal como señalan Prakoso *et al.* (2023), incluso bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo dentro del horno, pueden surgir variaciones en parámetros como la distribución térmica, humedad relativa, flujo de aire y nivelación en diferentes zonas. Estas variaciones pueden generar un secado no uniforme, dando lugar a las tensiones internas y provocando que ciertas zonas se compriman o se contraigan más que otras, lo que lleva a la formación de hundimientos, grietas o cavidades visibles en la superficie. Tal y como lo explica Defraeye *et al.* (2016), las tensiones internas son fuerzas que se desarrollan durante el proceso de secado, debido a la contracción o expansión desigual de diferentes zonas, lo que puede causar daños. Es importante destacar que, en BP elaboradas con almidón, la matriz se forma durante el secado de una dispersión

gelatinizada, donde los puentes de hidrogeno entre los grupos hidroxilo son los responsables de estabilizar la red polimérica (Anchundia et al., 2016). Una evaporación lenta favorece una organización más uniforme de las cadenas, mientras que un secado rápido puede provocar contracciones desiguales y estructuras menos ordenadas, generando tensiones internas y defectos morfológicos (Prakoso et al., 2023).

En el tratamiento con 50 ppm de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, las micrografías (d, e y f) revelan superficies con rugosidades distribuidas de manera heterogénea en la microestructura de la BP. A diferencia de las observaciones del tratamiento 0 ppm, en este caso se aprecian depresiones o cavidades de menor tamaño, pero en mayor cantidad, junto con algunas zonas que muestran aglomeración de NP. Este patrón sugiere una interacción inicial entre las NP y la matriz polimérica del almidón de jícama, la cual no es completamente uniforme a esta concentración. Este fenómeno se puede explicar a nivel molecular. Durante la gelatinización, los gránulos de almidón se hinchan, se rompen y liberan cadenas de amilosa y amilopectina, las cuales, aunque parcialmente desorganizadas, están disponibles para interactuar (Soto & Oliva, 2012). De esta manera las $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ se pueden unir a los grupos $-\text{OH}$ presentes en dicha molécula, mediante puentes de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals (Yaqoob *et al.*, 2025). Sin embargo, a esta concentración es posible que la interacción entre las NP y las cadenas de almidón no sean lo suficientemente intensas o uniformes para inducir un reacomodo completo y homogéneo. En su lugar, esta interacción inicial genera puntos de nucleación para las NP, lo que resulta en la formación de pequeños agregados y una superficie con rugosidades localizadas. Estudillo *et al.* (2023) reportaron en películas basadas en proteína de guandul, goma de semilla de tamarindo y AgNPs micrografías donde se observaba una estructura compacta, explicando que los grupos hidroxilos expuestos y disponibles pueden interactuar con el resto de los componentes de la formulación durante el reordenamiento a lo largo del secado.

En el tratamiento con 100 ppm de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, las micrografías (g, h e i) revelaron una superficie de la BP con mayor rugosidad que en los tratamientos de 0 y 50 ppm. No obstante, las depresiones o cavidades son de menor tamaño y se distribuyen de manera más uniforme, lo cual sugiere una mayor interacción de las NP en la matriz polimérica.

Sin embargo, persisten algunas zonas con aglomeración, lo que indica que la dispersión no es completamente ideal. Esta tendencia hacia una optimización en la distribución de las NP se evidencia de manera más pronunciada en el tratamiento con 150 ppm de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -NP. Las micrografías (j, k y l) exhiben una superficie notablemente más lisa en comparación con los tratamientos 0, 50 y 100 ppm. Esta reducción de las rugosidades sugiere una mejora sustancial en la dispersión de las NP dentro de la matriz. Dicho cambio podría atribuirse a una reorganización estructural inducida por la alta concentración de NP, donde su mayor disponibilidad facilita una interacción más uniforme con la red polimérica del almidón de jícama. Sin embargo, es fundamental reconocer que, a esta concentración la formación de aglomeración es más notoria. Esto podría deberse a la limitada capacidad de la matriz para dispersar individualmente cada NP, provocando que éstos se unan entre sí en algunas zonas. Estos hallazgos concuerdan con lo expuesto por Yaqoob *et al.*, (2025), quienes señalan que una dispersión adecuada de los nanomateriales dentro de una matriz polimérica es crucial para optimizar sus propiedades. Una distribución homogénea favorece la conformación de la red polimérica. Por el contrario, la aglomeración, puede alterar la estructura e inducir la formación de concentraciones de tensión localizadas, lo que resulta en efectos adversos sobre las propiedades finales del material. Cid *et al.* (2020) reportaron mediante SEM que la incorporación, presencia y dispersión de las CaO-NP en películas del látex de poli(acetato de vinilo-co-alcohol vinílico) tiende a formar aglomerados con dimensiones >200 nm. Por otro lado Choi & Kim (2024) explican que la presencia de uniformidad o rugosidad en películas que incorporan NP dependen de la dispersión de estas dentro de la matriz, así como de las condiciones de deposición durante el proceso de elaboración.

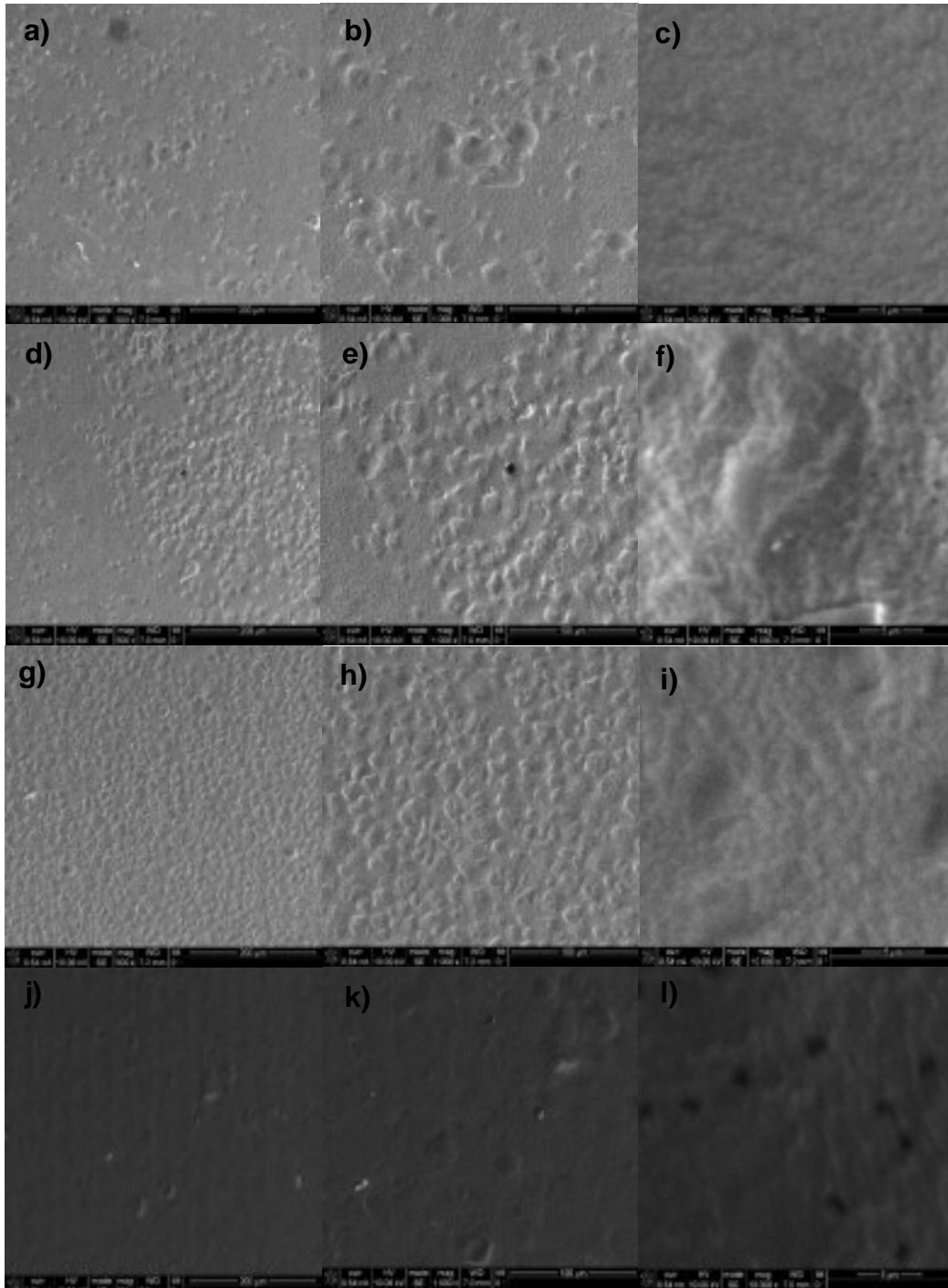


Figura 33. Micrografías T0 (a,b,c), T50 (d,e,f), T100 (g,h,i), T150 (j, k, l).

La composición química de las BP obtenida mediante espectroscopia de rayos X por dispersión de energía; se resume en Tabla 15. En la cual se reporta el porcentaje en peso y atómico del carbono (C), oxígeno (O) y calcio (Ca). Estos resultados son cruciales para analizar cómo la incorporación de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ afecta la composición elemental superficial de las BP elaboradas con almidón de jícama (Figura 34)

En lo que respecta al carbono y oxígeno, elementos constitutivos principales de la matriz, no presentaron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos en ambos parámetros. Sin embargo, se identificó una tendencia inversa en sus proporciones conforme aumentaba la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$. Específicamente, el porcentaje en peso del carbono aumentó de 23.94% (0 ppm) a 58.48% (150 ppm), mientras que el oxígeno disminuyó de 76.06% (0 ppm) a 36.82 % (150 ppm). Esta misma relación se replicó en los porcentajes atómicos, donde el carbono pasa de 29.54% a 65.80%, y el oxígeno de 70.46% a 32.02%, respectivamente. Esto podría deberse propiamente a la interacción de las NP con la matriz reduciendo o dejando expuesto en mayor medida alguno de los elementos. En cuanto al calcio, elemento aportado exclusivamente por las $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$, su ausencia en el tratamiento 0 ppm fue confirmada, como era de esperarse ya que no se le adicionaron las NP. Su presencia, sin embargo, fue evidente en los tratamientos con 50, 100 y 150 ppm, alcanzando valores de hasta 6.54% en peso y 2.19% en porcentaje atómico en el tratamiento con 150 ppm. Esta tendencia ascendente y proporcional confirma la incorporación efectiva de las $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ en las BP a medida que aumenta la concentración, siendo el tratamiento con 150 ppm significativamente diferente a los demás tratamientos. Estos resultados de EDX validan la presencia y la carga de nanopartículas en la superficie de las biopelículas, lo cual es coherente con las modificaciones morfológicas observadas mediante microscopía SEM, donde el incremento de NP conllevó a cambios en la rugosidad y patrón de dispersión.

Tabla 15. Resultados EDX

T	Elemento atómico	% Peso	% Atómico
0	C	23.94 ^a	29.54 ^a
	O	76.06 ^a	70.46 ^a
	Ca	0 ^b	0 ^b
50	C	41.90±8.88 ^a	49.39±10.74 ^a
	O	53.75±12.56 ^a	49.05±12.03 ^a
	Ca	2.67±0.89 ^b	0.82±0.20 ^b
100	C	44.90±14.03 ^a	52.13±14.96 ^a
	O	52.33±15.83 ^a	46.90±15.37 ^a
	Ca	2.78±1.44 ^b	0.97±0.48 ^b
150	C	58.48±9.58 ^a	71.89±9.61 ^a
	O	36.82±9.43 ^a	32.02±9.53 ^a
	Ca	6.54±1.43 ^a	2.19±0.48 ^a

Los superíndices diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Los valores reportados para el tratamiento 0 corresponden a una única medición ($n = 1$), por lo que no se incluye desviación estándar.

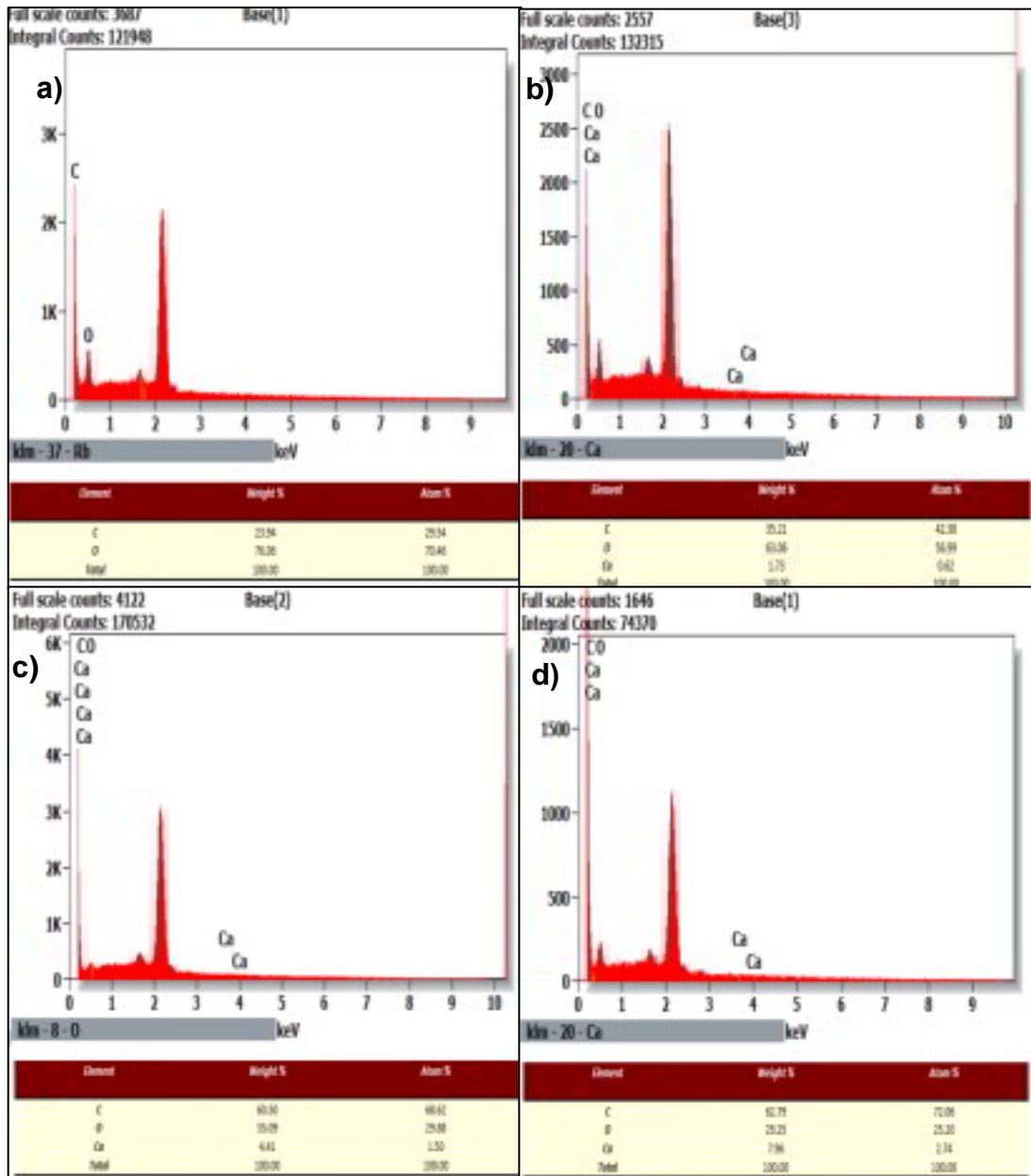


Figura 34. Espectro EDX T0(a), T50 (b), T100 (c), T150 (d).

Por su parte, la actividad antimicrobiana de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ frente a *E. coli*, *S. typhimurium* y *L. monocytogenes* a las 12 y 24 h, se presenta en la Tabla 16. El análisis inicial reveló que, en general, el efecto de las BP fue estadísticamente igual ($P<0.05$) frente a las tres cepas bacterianas. No obstante, la evaluación de cada uno de los tratamientos evidenció algunas particularidades para cada microorganismo.

En *E. coli*, los tratamientos con 50, 100 y 150 ppm de NP presentaron halos de inhibición significativamente mayores ($P<0.05$) en comparación con el tratamiento sin NP (0 ppm). Esta inhibición se mantuvo constante a las 12 y 24 h, sin observarse un aumento significativo ($P<0.05$) en los halos durante este periodo.

Respecto a *S. typhimurium*, los halos de inhibición permanecieron constantes a las 12 y 24 h, en ambos casos únicamente el tratamiento con 150 ppm de NP demostró un efecto significativamente mayor ($P<0.05$) al del tratamiento sin NP.

En el caso *L. monocytogenes*, a las 12 h, solo el tratamiento con 150 ppm de NP mostró un efecto antimicrobiano significativamente mayor ($P<0.05$) en contraste con el tratamiento sin NP. A las 24 h, aunque visualmente se percibió un ligero aumento en el efecto antimicrobiano de los tratamientos con 50 y 100 ppm de NP, el ANOVA específico para estos tratamientos confirmó que dicho aumento no fue estadísticamente significativo ($P<0.05$). Sin embargo, estos tratamientos, junto con el de 150 ppm de NP, presentaron halos de inhibición significativamente mayores ($P<0.05$) en comparación con el tratamiento sin NP.

Cabe destacar que, se observó una relación directa entre la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ en las BP y el efecto antimicrobiano, evidenciado por el aumento progresivo de los halos de inhibición. Sin embargo, este efecto se mantuvo significativamente menor ($P<0.05$) en comparación con el control positivo, lo que sugiere que las BP carecen de la misma eficacia que un antibiótico como el aplicado en esta investigación. De esta manera, el comportamiento observado sugiere un efecto bacteriostático, en el que las BP adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ inhiben el crecimiento bacteriano (Calvo & Martínez, 2009).

Tabla 16. Resultados del efecto antimicrobiano de las BP adicionadas con Ca(OH)₂-NP

T	T	Diámetro de la zona de inhibición (mm)		
		<i>E. coli</i>	<i>S. thyphimurium</i>	<i>L. monocytogenes</i>
12 h	0	0.00±0.00 ^{a,f}	0.00±0.00 ^{a,e}	0.00±0.00 ^{a,d}
	50	1.00±0.00 ^{a,e}	1.00±0.00 ^{a,de}	1.00±0.00 ^{a,cd}
	100	1.22±0.39 ^{a,e}	1.00±0.00 ^{a,de}	1.00±0.00 ^{a,cd}
	150	2.78±0.39 ^{a,d}	1.89±0.20 ^{a,d}	1.78±0.69 ^{a,c}
	C(+)	4.00±0.85 ^{a,c}	4.67±1.78 ^{a,c}	2.25±1.82 ^{b,c}
	C(-)	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^d
	0	0.00±0.00 ^{a,f}	0.00±0.00 ^{a,e}	0.00±0.00 ^{a,f}
24 h	50	1.00±0.00 ^{a,e}	1.00±0.00 ^{a,de}	1.23±0.40 ^{a,de}
	100	1.33±0.58 ^{a,e}	1.00±0.00 ^{a,de}	1.33±0.58 ^{a,de}
	150	2.77±0.40 ^{a,d}	1.89±0.20 ^{a,d}	1.77±0.68 ^{a,cd}
	C(+)	4.33±0.65 ^{a,c}	4.75±1.29 ^{a,c}	2.83±1.75 ^{b,c}
	C(-)	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f

Los superíndices "a-b" indican diferencias significativas ($P<0.05$) por filas, los superíndices "d-f" indican diferencias significativas ($P<0.05$) por columnas.

La ausencia de diferencias significativas ($P<0.05$) en los halos de inhibición entre *E. coli*, *S. thyphimurium* y *L. monocytogenes* sugiere que las BP de almidón de jícama adicionadas con Ca(OH)₂-NP tienen un mecanismo de acción de amplio espectro. Este resultado es relevante dado que las bacterias tienen diferencias estructurales en sus paredes celulares, esta variabilidad tiene implicaciones importantes en su susceptibilidad a los agentes antimicrobianos y en su interacción con el entorno. Wang *et al.* (2017) señala que algunos nanomateriales como las NP han demostrado propiedades antibacterianas de amplio espectro contra bacterias Gram+ y Gram-. La pared celular es una estructura compleja y semirrígida esencial para la supervivencia y funcionalidad de la mayoría de bacterias. Desempeña un papel fundamental ya que evita la ruptura de la célula bacteriana cuando la presión hidrostática intracelular supera la presión hidrostática extracelular; además proporciona soporte, protección y contribuye a diversos procesos biológicos importantes. Las bacterias Gram+ (como *L. monocytogenes*) cuentan con una

membrana citoplásmica rodeada por una pared celular gruesa y rígida compuesta por múltiples capas de peptidoglucano (que constituye el 50% del material de la pared celular) y ácidos teicoicos, los cuales son un factor de virulencia. Por otro lado, las bacterias Gram- (como *E. coli* y *S. typhimurium*) poseen una estructura más compleja, cuentan con dos membranas: la membrana interna (citoplásmica) y la membrana externa la cual contiene lipopolisacáridos (LPS), reconocidos como un factor de virulencia. Además entre ambas membranas se encuentra una capa delgada de peptidoglucano (que constituye un 5-10% del peso de la pared celular) denominado espacio periplásmico (Molina & Uribarren, 2017; Morales, 2018).

El efecto bacteriostático se atribuye principalmente a la adición de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$. Esquivias (2018) señala que el Ca(OH)_2 es un compuesto con propiedades antimicrobianas que contribuye a eliminar o reducir la presencia de bacterias. Este efecto se debe a su disociación en solución acuosa, liberando iones de calcio (Ca^{2+}) e hidroxilo (OH^-), de tal manera que el pH del medio circundante incrementa significativamente (aproximadamente 12.5), creando un ambiente fuertemente alcalino. La mayoría de las bacterias patógenas como *E. coli*, *S. typhimurium* y *L. monocytogenes* son incapaces de sobrevivir bajo estas condiciones, ya que un pH superior a 9.5, altera profundamente su fisiología (A. J. García & Fernández, 2016; Muñoz et al., 2011; Parra et al., 2002). En particular, los iones OH^- pueden desestabilizar la membrana citoplasmática, dañar el ADN y provocar la desnaturalización de proteínas esenciales, lo que finalmente provoca daño o muerte celular (Mohammadi et al., 2012).

Este mecanismo coincide con lo reportado por Lian et al. (2021), quienes observaron un efecto bacteriostático en películas elaboradas con almidón de maíz, quitosano y glicerol, a las cuales les adicionaron nanopartículas de óxido de Zinc (ZnO-NP). Estas películas fueron evaluadas frente a dos bacterias patógenas de gran relevancia: *S. aureus* y *E. coli*. Los resultados mostraron que las películas con un 6% (p/p) de ZnO-NP generaron halos de inhibición de 29.36, 24.90 y 22.00 mm contra *S. aureus* después de 0, 7 y 14 días, respectivamente. En el caso de *E. coli*, los halos de inhibición fueron de 22.00, 19.00 y 12.98 mm en los mismos intervalos de tiempo. Sin embargo, estos resultados en comparación con los obtenidos en el presente estudio, son

considerablemente mayores. Esta diferencia puede explicarse, en gran medida, por la concentración y el tipo de nanopartícula empleada. Mientras que Lian *et al.* utilizaron ZnO-NP al 6%, en este estudio se emplearon Ca(OH)₂-NP al 0.005, 0.010 y 0.015 % (resultado de la conversión de ppm a porcentaje), por lo cual la concentración podría haber influido directamente en la eficacia antimicrobiana observada.

Este comportamiento también se evidenció en los tratamientos de esta investigación, donde a mayor concentración de Ca(OH)₂-NP, se observó una mayor inhibición del crecimiento bacteriano. Las BP con 150 ppm de NP generaron halos de inhibición significativamente mayores ($P < 0.05$) frente a las tres cepas bacterianas, tanto a las 12 como a las 24 h, confirmando un patrón dosis-dependiente. Hallazgos similares fueron reportados por Heo *et al.* (2024), quienes desarrollaron películas de etileno alcohol vinílico para envases antimicrobianos incorporando peróxido de calcio (CaO₂) sintetizado a partir de residuos de cáscara de huevo. En su estudio, las películas que contenían 3% de CaO₂ (a diferencia de las concentraciones empleadas en la presente investigación que fueron de 0.05, 0.01 y 0.015% de Ca(OH)₂-NP haciendo la respectiva conversión de unidades) inhibieron significativamente el crecimiento bacteriano, alcanzando tasas de inactivación del 99.99% para bacterias Gram- y del 97.24% para bacterias Gram+

CONCLUSIONES

La caracterización de las BP de almidón de jícama adicionadas con $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ reveló que las propiedades fisicoquímicas y antimicrobianas variaron en función de la concentración de las NP, mostrando los efectos más pronunciados en el tratamiento con 150 ppm. La solubilidad en agua disminuyó significativamente, lo cual es beneficioso, ya que una baja solubilidad es fundamental para que las BP mantengan su forma y función al estar en contacto con productos o ambientes de alta humedad. El contenido de humedad aumentó significativamente; si bien el nivel ideal de humedad depende de la aplicación, el porcentaje alcanzado a 150 ppm indicó una mayor flexibilidad del material. La permeabilidad al vapor de agua (WVP), no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo se observó una ligera disminución a 150 ppm, lo que sugiere que concentraciones mayores podrían mejorar esta propiedad de barrera. La opacidad aumentó, lo cual resulta útil para la protección de alimentos sensibles a la luz. Las características de color y el espesor de las BP se mantuvieron estables, asegurando una apariencia visual uniforme y un rendimiento consistente. El incremento en la elongación al rompimiento y la disminución en la resistencia a la tensión y el módulo de Young sugieren que la BP podría adaptarse a la forma de un producto y resistir el manejo y transporte sin romperse. Morfológicamente, la presencia de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ fue confirmada por el análisis EDX. Las micrografías del tratamiento con 150 ppm revelaron una superficie más uniforme a nivel macroscópico, lo cual es positivo para la estética e interacción con otras superficies. Sin embargo, la presencia de aglomeración a nano escala indica la necesidad de desarrollar mejores métodos de dispersión de las NP para optimizar el rendimiento a nivel microestructural. La incorporación de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ dotó a las BP de un efecto bacteriostático efectivo frente a *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* y *Listeria monocytogenes*, esta actividad es fundamental para inhibir el crecimiento microbiano en la superficie de un alimento, extendiendo su vida útil y mejorando la seguridad alimentaria. Sin embargo, estos datos resaltan la necesidad de optimizar la concentración de $\text{Ca(OH)}_2\text{-NP}$ en las BP para mejorar su eficacia. Además, se sugiere realizar estudios de concentración inhibitoria mínima (MIC), con el fin de determinar la dosis más baja capaz de inhibir el crecimiento bacteriano. Este tipo de

análisis permitiría cuantificar con mayor precisión la eficacia del compuesto y orientar el desarrollo de formulaciones más eficientes. Igualmente, se recomienda ampliar el periodo de evaluación a siete días para observar la persistencia del efecto antimicrobiano a lo largo del tiempo, lo que proporcionaría información clave para su aplicación en sistemas de conservación alimentaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abud, M., Vázquez-Mandujano, D. G., Ruiz-Cabrera, M. A., Grajales-Lagunes, A., Moscosa-Santillán, M., Ventura-Canseco, L. M. C., Gutiérrez-Miceli, F. A., & Dendooven, L. (2008). Optimización de la deshidratación osmótica del frijol ñame (*Pachyrhizus erosus*) mediante un diseño experimental ortogonal. *Journal of Food Engineering*, *84*(3), 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.003>

Aguilar, A., (2013). *Caracterización de propiedades fisicoquímicas, térmicas, reológicas y propiedades de barrera a los gases de películas comestibles elaboradas a partir de mucílago de Salvia hispánica y pectina cítrica*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

AINIA, & AIMPLAS. (2016). *La correcta especificación de los envases* [Informativo].<https://www.ecoembesthecircularcampus.com/web/app/uploads/2021/01/la-correcta-especificacion-de-los-envases.pdf>

Almeida, A. C., Franco, E. A., Peixoto, F. M., Pessanha, K. L., & Melo, N. R. (2015). *Aplicación de nanotecnología en embalaje de alimentos*. *Polímeros*, *25*(spe), 89-97. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2069>

Anchundia, K., Santacruz, S., & Coloma, J. (2016). *Caracterización física de películas comestibles a base de cáscara de plátano (Musa Paradisiaca)*. *Revista chilena de nutrición*, *43*(4), 394-399. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000400009>

Anderson, J., & Hodson, S. K. (2001). *Composiciones termoplásticas de almidón que incorporan un componente de relleno particulado—Google Patents* (Patent US 6231970 B1). <https://patents.google.com/patent/US6231970/en>

Arrieta, Á. A., & Palencia, M. S. (2016). *Estudio electroquímico de un biopolímero compuesto PPy/almidón de cassava*. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(1), 26-35. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0255-69522016000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es

ASTM. (2017). *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM international. <https://www.astm.org/e0096-00.html>

ASTM. (2024). *ASTM International latinoamérica*. ASTM Latinoamérica. <https://la.astm.org/es/>

Axayacatl, O., (2022). *Estadísticas de producción de jícama en México*. *Blog Agricultura*. <https://blogagricultura.com/estadisticas-jicama-mexico/>

Bertuzzi, M. A., Castro Vidaurre, E. F., Armada, M., & Gottifredi, J. C. (2007). *Water vapor permeability of edible starch based films*. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972-978. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.016>

Biliaderis, C. G. (2009). Chapter 8—*Structural Transitions and Related Physical Properties of Starch*. En J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch (Third Edition)* (pp. 293-372). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00008-2>

Bonivento, L. R., & Berrocal, J. E. (2011). *Elaboración de una película comestible a base de colágeno incorporado con nisina como agente antimicrobiano para reducir la pérdida de humedad y oxidación de las grasas en filetes de carne de cerdo en refrigeración [Tesis de grado]*. Universidad de Cartagena.

Bósquez, E., & Vernon, E. J. (2005). Efecto de plastificantes y calcio en la permeabilidad al vapor de agua de películas a base de goma de mezquite y cera de candelilla. *Revista mexicana de ingeniería química*, 4(2), 157-162.

Burciaga, H. C. (2001). *Comportamiento físico-químico durante el desarrollo del tubérculo de jícama (Pachyrhizus erosus L. Urban)* [Presentada como requisito parcial para obtener el grado académico de maestría en ciencias especialidad en alimentos, Universidad Autónoma de Nuevo León]. pdf.

Calvo, J., & Martínez-Martínez, L. (2009). Mecanismos de acción de los antimicrobianos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 27(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2008.11.001>

Cao, L., Liu, J., Meng, Y., Hou, M., Li, J., Song, Y., Wang, Y., Song, H., Zhang, R., Liang, R., & Guo, X. (2024). A tear-free and edible dehydrated vegetables packaging film with enhanced mechanical and barrier properties from soluble soybean polysaccharide blending carboxylated nanocellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130707>

Carrillo, K. I. (2024). *Obtención y caracterización de películas comestibles a base de almidón de maíz acetilado y microcristales de celulosa aislados de Padina durvillaei* [Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos]. Universidad Autónoma de Sinaloa.

Castañeda, E. (2000). *Utilización de jícama (pachyrhizus erosus l. urban) en la elaboración de pan blanco para favorecer su calidad nutricional* [Presentada como requisito parcial para obtener el grado académico de maestría en ciencias especialidad en alimentos]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Castillo, V. K., Ochoa, M. L., Figueroa, C. J., Delgado, L. E., Gallegos, I. J., & Morales, C. J. (2009). Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (*Zea mays L.*) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(4), 425-432. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0004-06222009000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Castro, A. C., Meza, J. A., Valenzuela, V. L., Palazuelos, E. A., Vargas, P. R., Nieblas, C. I., Díaz, A. L., Hernández, I. L., Ariadna, X. A., & Valenzuela, N. J. (2024). Desarrollo y optimización de películas comestibles de almidón de maíz incorporando aceite esencial de citronela y nanopartículas de calcio. *QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas*, 2, Article 2. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/article/view/841>

CCH UNAM. (2015). *Polisacáridos*. Portal Académico del CCH. <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica2/unidad2/carbohidratos/polisacaridos>

Cedeño, L. A., Armijos Cabrera, G., Arias-Toro, D., & Bravo Bravo, V. (2023). *Efecto del glicerol como plastificante en películas de almidón de maíz modificado*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10045595>

Cid, M. L. (2020). *Recubrimiento de Poli(Acetato De Vinilo-Co-Alcohol Vinílico) Adicionado con Nanopartículas de Óxido de Calcio y su Efecto en la Poscosecha de Pepino (Cucumis sativus)* [Centro de Investigación en Química Aplicada]. pdf. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/628/1/Tesis%20MAP%20Ma.%20Luisa%20Cid%20L%20c3%b3pez%202020.pdf>

Correa, D. A., & Santillán, L. (2016). *Factibilidad económica de la explotación de roca caliza para producir óxido de calcio en la concesión minera no metálica* [Tesis para optar el título profesional]. Universidad Privada del Norte.

Dai, L., Qiu, C., Xiong, L., & Sun, Q. (2015). *Characterisation of corn starch-based films reinforced with taro starch nanoparticles*. *Food Chemistry*, 174, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.005>

Dai, L., Zhang, J., & Cheng, F. (2020). *Cross-linked starch-based edible coating reinforced by starch nanocrystals and its preservation effect on graded Huangguan pears*. *Food Chemistry*, 311, 125891. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125891>

Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., & Pranzetti, V. (2010). *El color en los alimentos*: 25, 145-152.

Devi, L. S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). *Lipid incorporated biopolymer based edible films and coatings in food packaging: A review*. *Current Research in Food Science*, 8, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2024.100720>

Domínguez, J. M., Román Gutiérrez, A. D., Prieto García, F., & Acevedo Sandoval, O. (2012). *Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 141-155.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-09342012000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Enríquez C, M., Velasco M, R., & Ortiz G, V. (2012). Composition and processing of starch-based biodegradable films. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 182-192.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1692-35612012000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Escobar, D., Sala, A., Silvera, C., Harispe, R., & Márquez, R. (2011). *Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: Estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador*. *INNOTEC*, 4. <https://doi.org/10.26461/04.07>

Estrela, C., & Pecora, J. (2003). *Características químicas del hidróxido de calcio*. <https://www.forp.usp.br/restauradora/calcao/quimica.htm>

FAO. (2024). *Jícama*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/traditional-crops/yambean/es/>

Fernández, J. A. (2004). *Estudio de la interacción de los biopolímeros caseína y almidón por el proceso de extrusión* [Requisito para obtener el grado de doctor en ciencias en tecnología avanzada]. Instituto Politécnico Nacional.

FIRCO. (2018). *Jícama, nutritiva y deliciosa*. gob.mx. <http://www.gob.mx/firco/articulos/jicama-nutritiva-y-deliciosa?idiom=es>

Fonseca, R. M. (2022). *Jícama con limón y nutraceuticos*. Laboratorio de Plantas Vasculares, Facultad de Ciencias, UNAM; pdf.

García, A. J., & Fernández, E. J. Q. (2016). *Supervivencia y parámetros cinéticos de Escherichia coli en zumos de frutas naturales*. [Trabajo de fin de grado]. Universidad de Valladolid.

García, B. A., Rosas, W., & Morales, B. E. (2024). *Jícama de descarte: Del desecho a su aprovechamiento*. *Revista Agraria*, 21(2), 13-16. <https://www.revistaagraria.com/index.php/agraria/article/view/588/539>

García, H. (2021). *Manejo de los escenarios de pérdida de circulación, parcial o total, en la región marina Noreste y Suroeste del Golfo de México* [Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Garnica, O. E. (2002). *Permeabilidad al vapor de agua y propiedades mecánicas de películas modificadas de quitosan* [Requisito para obtener el título de Ingeniero en Alimentos]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gomes, F. L., de Lima Leite, R. H., Gomes dos Santos, F. K., Aria, A. I., & Aroucha, E. M. M. (2021). *Biopelículas de almidón de mandioca y quitosano mejoradas con TiO₂ para envases alimentarios sostenibles. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127661. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127661>

Gómez, M. (2018). *Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>

González, R. A., Sotelo, M., & Gutiérrez, F. (2016). *Películas de almidón de papa obtenidas por casting y extrusión reforzadas con montmorillonita de sodio modificada. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2), 627-632.

Guaña, F., Vaca-Tenorio, M., & Aguilar-Morales, J. (2022). *Biopelículas y envases activos, nuevas tecnologías en la industria alimentaria. FACSALUD-UNEMI*, 6(10), Article 10. <https://doi.org/10.29076/issn.2602-8360vol6iss10.2022pp18-32p>

Harish, Kumar, P., Malhotra, B., Phalswal, P., Khanna, P. K., Salim, A., Singhal, R., & Mukhopadhyay, A. K. (2020). *Effect of reaction rate on the properties of chemically synthesized calcium hydroxide nanoparticles. Materials Today: Proceedings*, 28, 2305-2310. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.581>

Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A. I., Zia, K. M., & Akhtar, N. (2018). *Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 1095-1107. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>

Heo, W., Shin, H., Ansari, J. R., Park, K., & Seo, J. (2024). *Preparation and properties of calcium oxide and calcium peroxide from eggshell waste for enhanced antimicrobial activity. Materials Today Communications, 41, 110531.* <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110531>

Hernández, L., Gonzales-Gonzales, A., Gutiérrez-Mendez, N., Muñoz-Castellanos, L. N., & Quintero-Ramos, A. (2011). *Estudio de la actividad antibacteriana de películas elaboradas con quitosano a diferentes pesos moleculares incorporando aceites esenciales y extractos de especias como agentes antimicrobianos. Revista mexicana de ingeniería química, 10(3), 455-463.* http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1665-27382011000300011&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Hernandez, V. M., & Krochta, J. M. (2008). *Thermoplastic Processing of Proteins for Film Formation—A Review. Journal of Food Science, 73(2), R30-R39.* <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00636.x>

Jayaraj, S., Jayasree, J. N., & Murali, T. (2024). *Applications and synthesis processes of biosynthesized calcium oxide nanoparticles with sulfamethoxazole: A comprehensive review. Nano-Structures & Nano-Objects, 39, 101244.* <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101244>

Jouki, M., Khazaei, N., Ghasemlou, M., & HadiNezhad, M. (2013). *Effect of glycerol concentration on edible film production from cress seed carbohydrate gum. Carbohydrate Polymers, 96(1), 39-46.* <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.077>

Khin, M. N., Ahammed, S., Kamal, Md. M., Saqib, M. N., Liu, F., & Zhong, F. (2024). *Investigating next-generation edible packaging: Protein-based films and coatings for delivering active compounds. Food Hydrocolloids for Health, 6, 100182.* <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2024.100182>

Kishore, A., Patil, R. J., Singh, A., & Pati, K. (2024). *Jícama (Pachyrhizus spp.) un almidón no convencional: Una revisión sobre su aislamiento, composición, estructura, propiedades, modificaciones y su aplicación. International Journal of Biological Macromolecules, 258, 129095.* <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129095>

Kong, P., Rosnan, S. M., & Enomae, T. (2024). *Carboxymethyl cellulose–chitosan edible films for food packaging: A review of recent advances*. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122612. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122612>

Kong, P. S., Aroua, M. K., & Daud, W. M. A. W. (2016). *Conversion of crude and pure glycerol into derivatives: A feasibility evaluation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 533-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.054>

Lian, R., Cao, J., Jiang, X., & Rogachev, A. V. (2021). *Physicochemical, antibacterial properties and cytocompatibility of starch/chitosan films incorporated with zinc oxide nanoparticles*. *Materials Today Communications*, 27, 102265. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102265>

Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Martínez-Bustos, F., Montoya-Rodríguez, Á., Camacho-Hernández, I. L., Zazueta-Morales, J. D. J., Jacobo-Valenzuela, N., & Carrillo-López, A. (2022). *Edible starch films enhanced using CaCO₃ nanoparticles and plasticizers by optimized extrusion-casting process*. *Biotecnia*, 24(3), 52-62. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1508>

Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Martínez-Bustos, F., Montoya-Rodríguez, A., Camacho-Hernández, I. L., Zazueta-Morales, J. J., Jacobo-Valenzuela, N., Carrillo-López, A., Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Martínez-Bustos, F., Montoya-Rodríguez, A., Camacho-Hernández, I. L., Zazueta-Morales, J. J., Jacobo-Valenzuela, N., & Carrillo-López, A. (2022). *Elaboration of edible starch films using CaCO₃ nanoparticles and plasticizers by optimized extrusion-casting process*. *Biotecnia*, 24(3), 52-62. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1508>

Lisi, M. S. (2012). *Caracterización de almidones de maíz: nativo y modificados*. Universidad Católica de Córdoba.

Long, J., Zhang, W., Zhao, M., & Ruan, C.-Q. (2023). *The reduce of water vapor permeability of polysaccharide-based films in food packaging: A comprehensive review*. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121267>

Mariano. (2011). *Propiedades ópticas. Tecnología de los Plásticos. Propiedades ópticas | Tecnología de los Plásticos.* <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-opticas.html>

Mariano. (2011). *Moldeo por compresión | Tecnología de los Plásticos. Moldeo por compresión | Tecnología de los Plásticos.* <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-compresion.html>

Martínez, F., López, M., Zazueta, J. J., & Morales, E. (2005). *Preparación y propiedades de almidones pregelatinizados.*

Mathias, K., & Ah-Hen, K. (2014). *El color en los alimentos un criterio de calidad medible. Agro Sur, 42(2), 57-66.* <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>

Matta, E. G., & Bertola, N. (2020). *Desarrollo y caracterización de películas comestibles de pectina plastificadas con isomalt. II, 7.*

Matthew, A., Penieres, J. G., & Ortega, F. (2023). *Solubilidad.* UNAM, Facultad de estudios superiores Cuautitlan.

McHugh, T. H. (2000). *Protein-lipid interactions in edible films and coatings. Nahrung/Food, 44(3), 148-151.* [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20000501\)44:3<148:AID-FOOD148>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20000501)44:3<148:AID-FOOD148>3.0.CO;2-P)

McKeen, L. W. (2012). *Introduction to plastics and polymers: Vol. Plastics Design Library (3.^a ed.).* William Andrew Publishing. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781437734690100025>

Mohamed, S. A. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A.-M. (2020). *Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. Carbohydrate Polymers, 238, 116178.* <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>

Mohammadi, Z., Shalavi, S., & Yazdizadeh, M. (2012). *Antimicrobial Activity of Calcium Hydroxide in Endodontics: A Review. Chonnam Medical Journal, 48(3), 133-140.* <https://doi.org/10.4068/cmj.2012.48.3.133>

Molina, J., & Uribarren, T. (2017). *Generalidades de las bacterias*. *Bacteriología*. <https://microypara.facmed.unam.mx/index.php/generalidades-de-las-bacterias/>

Montenegro, M. J. (2020). *Efecto del alcohol de polivinilo (PVOH) en las propiedades físico-mecánicas de biopelículas elaboradas con aislado proteico de Sacha Inchi*. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial].

Montes, R. (2019). *Jícama: Propiedades, beneficios e información nutricional*.

Montoya, D. (2015). *Acetilación enzimática de almidones: Una opción de valor agregado*. *Tumbaga*, 1(10), 6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5644631>

Morales, N. Y. (2018). *Diferenciando Bacterias Gram Positivo (+) y Gram Negativo (-) Mediante Tinción de Gram*. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje - CUAIEED - UNAM. <https://uapa.cuaieed.unam.mx/node/1071>

Moreno, J., Rosell, C. M., & Bello-Pérez, L. A. (2024). *The multiscale structure of banana starch related to the physicochemical, thermal, functional and digestibility characteristics: A review*. *Food Hydrocolloids*, 110646. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110646>

Muñoz, A. I., Vargas, M., Otero, L., Díaz, G., & Guzmán, V. (2011). *Presencia de Listeria monocytogenes en alimentos listos para el consumo, procedentes de plazas de mercado y delicatessen de supermercados de cadena, Bogotá, D.C, 2002-2008*. *Biomédica*, 31(3), 428-439. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-41572011000300015&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Nur, Z. A., Roos, Y. H., & Kerry, J. P. (2014). *Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.027>

OMS, & FAO. (2011). *Codex alimentarius leche y productos lácteos*.

Oropeza, R. A., Montes Hernández, A. I., & Padrón Pereira, C. A. (2016). *Películas biodegradables a base de almidón: Propiedades mecánicas, funcionales y*

biodegradación. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 7(1)(065-093), 30.

Otey, F. H., & Westhoff, R. P. (1979). *Biodegradable film compositions prepared from starch and copolymers of ethylene and acrylic acid* (United States Patent US4133784A). <https://patents.google.com/patent/US4133784A/en>

Parra, M., Durango, J., & Mattar, S. (2002). *Microbiología, patogénesis, epidemiología, clínica y diagnóstico de las infecciones producidas por Salmonella*. *Revista MVZ Córdoba*. <https://doi.org/10.21897/rmvz.521>

Parreidt, T. S., Kajetan, M., & Markus, S. (2018). *Desarrollo y estudio de las propiedades mecánicas y permeabilidad de películas a base de almidón. (Número Especial Innovaciones en Películas y Recubrimientos Comestibles, 7(10)*. <https://www.mdpi.com/2304-8158/7/10/170>

Pérez, L., Soazo, M., David, M., Rubiolo, A., & Verdini, R. (2012). *Actividad antimicrobiana de películas comestibles elaboradas a base de proteínas del lactosuero y glicerol incorporadas con sales orgánicas*. *ResearchGate*, 5-9. <https://www.researchgate.net/publication/268808614>.

Pérez, M. B., & Jong, R. W. (2014). *Materiales de recubrimiento y películas comestibles: Bicapas lipídicas y emulsiones lipídicas—ScienceDirect*. 2, 325-350. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123946010000138?via%3Dihub>

Prakoso, F. A. H., Indiarito, R., & Utama, G. L. (2023). *Edible Film Casting Techniques and Materials and Their Utilization for Meat-Based Product Packaging*. *Polymers*, 15(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/polym15132800>

Priyanka, S., S. Karthick Raja Namasivayam, John F. Kennedy, & Meivelu Moovendhan. (2024). *Starch-chitosan-Taro mucilage nanocomposite active food packaging film doped with zinc oxide nanoparticles – Fabrication, mechanical properties, anti-bacterial activity and eco toxicity assessment*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134319. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134319>

Ramirez-Balboa, G., Balois.Morales, R., León-Fernández, A. E., Bautista-Rosales, P. U., Jiménez-Zurita, J. O., & Montalvo-González, E. (2023). *Caracterización fisicoquímica y proximal de almidón y harina de jícama (Pachyrhizus erosus L.)*. 10 e1427, 17. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1427>

Ramos, A. M., Renard, C. M. G. C., Wicker, L., & Contreras-Esquivel, J. C. (2013). *Avances y perspectivas de Pachyrhizus spp. En la ciencia y biotecnología de los alimentos. Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.09.003>

Ramos, M. de L., Romero-Bastida, C., & Bautista-Baños, S. (2018). *Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas frescas*. 19.

Rodríguez, E. N. (2011). *Uso de agentes antimicrobianos naturales en la conservación de frutas y hortalizas. Ra Ximhai*, 153-170. <https://doi.org/10.35197/rx.07.01.2011.14.er>

Román, J. A., Rosas-Acevedo, J. L., Rodríguez-Herrera, A. L., Palma-Rodríguez, H. M., Vargas-Torres, A., & Juárez-López, A. L. (2021). *Evaluación de solubilidad y pérdida de peso en la degradación de biopelículas elaboradas a base de mezclas de harina de plátano y chayotextle. RINDERESU*, 5(1), Article 1. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/56>

Romero, C. A., Zamudio-Flores, P. B., & Bello-Pérez, L. A. (2011). *Antimicrobianos en películas de almidón oxidado de plátano: Efecto sobre la actividad antibacteriana, microestructura, propiedades mecánicas y de barrera. Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 445-453. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1665-27382011000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Romero, J. R., & Llorente, J. R. (2013). *Estudio de factibilidad para la construcción de una planta de hidróxido de calcio y comercialización de su producto en la provincia del guayas*. [Tesis para maestría en administración de empresas, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. pdf.

Rout, S. S., & Pradhan, K. C. (2024). *A review on antimicrobial nano-based edible packaging: Sustainable applications and emerging trends in food industry*. *Food Control*, 163, 110470. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110470>

SADER. (2019). *Jícama, una raíz muy jugosa*. gob.mx. <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/jicama?idiom=es>

Salinas, V. M. (2014). *Caracterización de películas comestibles a base de mucílago de nopal (Opuntia ficus indica) y evaluación de su aplicación como recubrimiento comestible en ciruela (Prunus salicina L.) para su conservación en fresco* [Tesis para optar por el grado de maestro en ingeniería química-bioingeniería]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Santoyo, J. A. (2014). *Resultados de la validación de variedades de jícama en el sur de Sinaloa*. 1, 1, 11. <https://www.fps.org.mx/portal/index.php/notas/1568-resultados-de-la-validacion-de-variedades-de-jicama-en-el-sur-de-sinaloa>

Schmiele, M., Sampaio, U. M., & Pedrosa, M. T. (2019). Chapter 1 - *Basic Principles: Composition and Properties of Starch*. En M. T. P. Silva Clerici & M. Schmiele (Eds.), *Starches for Food Application* (pp. 1-22). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00001-0>

Shah, Y. A., Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Tarahi, M., Almasi, H., Chawla, R., & Ali, A. M. M. (2024). Insights into recent innovations in barrier resistance of edible films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271, 132354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132354>

Sifuentes, I. N. (2011). *Elaboración y caracterización de películas conformadas por biomoléculas y nanopartículas* [Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos]. Instituto Politécnico Nacional.

Sigma Aldrich. (2013). Hidróxido De Calcio. *Kemiker*. <https://kemiker.com/producto/hidroxido-de-calcio/>

Sigma Aldrich. (2013). *Hola técnica de seguridad del material*. <https://dcb.ingenieria.unam.mx/wp-content/themes/temperachild/CoordinacionesAcademicas/FQ/Q/LQ/HS/Glicerina.pdf>

Silva, C., Bobillier, F., Díaz, B., Seura, P., Canales, D., & Zapata, P. (2018). *Polímero con incorporación de nanopartículas de CaO para envase de alimentos*. (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual Patent WO 2018/014144 A1).

Solano, L. G., Alamilla-Beltrán, L., & Jiménez-Martínez, C. (2018). *Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados*. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 21, 30. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>

Solé, J. (2021). *La permeabilidad al vapor de los materiales aislantes*. *URSA Ibérica*. <https://www.ursa.es/faq/permeabilidad-al-vapor-de-los-materiales-aislantes/>

Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2005). 23—*Plasticizers in edible films and coatings*. En J. H. Han (Ed.), *Innovations in Food Packaging* (pp. 403-433). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012311632-1/50055-3>

Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2010). *Films, Edible*. En *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (pp. 1-12). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0471238961.filmkroc.a01>

Soto, D., & Oliva, H. (2012). *Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión*. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(2), 154-175. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0255-69522012000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Suministro de Especialidades, S. A. de C. V. (2018). *Hoja técnica*. [Hidróxido de Clacio].

Sun, J., Jiang, H., Wu, H., Tong, C., Pang, J., & Wu, C. (2020). *Multifunctional bionanocomposite films based on konjac glucomannan/chitosan with nano-ZnO and mulberry anthocyanin extract for active food packaging*. *Food Hydrocolloids*, 107, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105942>

Sun, Q., Xi, T., Li, Y., & Xiong, L. (2014). *Characterization of Corn Starch Films Reinforced with CaCO₃ Nanoparticles*. *PLOS ONE*, 9(9), e106727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106727>

Toledo, E. (2011). *Evaluación de harinas de plátano y papa como fuentes energéticas alternativas para la alimentación animal*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Torregrosa, B. (2014). *Caracterización de películas biodegradables con la incorporación de un agente de biocontrol*. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>

Totosaus, A., Pérez-Chabela, M. de L., & Gutiérrez-Cruz, R. (2016). *Películas comestibles de caseinato de sodio y carragenina como acarreadoras de bacterias lácticas termotolerantes*. 1(2), 7.

Trujillo, C. T. (2014). *Obtención de películas biodegradables a partir de almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz) doblemente modificado para uso en empaque de alimentos* [Presentada como requisito para obtener el título de ingeniero industrial]. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Tufiño, M. G. (2014). *Diseño de una planta para la elaboración de tres productos a base de jícama (smallanthus sonchifolius) para la provincia de pichincha* [Trabajo de titulación de ingeniera agroindustrial y de alimentos]. Universidad de las Américas.

Valenzuela, C., & Arias, J. I. (2012). *Potenciales aplicaciones de películas de quitosano en alimentos de origen animal: Una revisión*. *Avances en Ciencias Veterinarias*, 27(1). <https://doi.org/10.5354/0716-260X.2012.21997>

Velasco, L. (2023). *Síntesis y caracterización de los pigmentos casiterita amarilla de estaño-vanadio, (SN,V)O₂ y casiterita gris de estaño-antimonio, (SN,SB)O₂* [Tesis para obtener el título de licenciada en química]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ventura, Y., Díaz, R., Soriano, J., & Barraza, G. (2024). *Modificación química de almidón procedente de semillas de frutos: Métodos, propiedades y aplicaciones*. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 311-325. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.024>

Yang, L., & Paulson, A. T. (2000). *Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films*. *Food Research International*, 33(7), 563-570. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00092-2)

Yaqoob, S., Ali, Z., Ali, S., & D'Amore, A. (2025). *Polystyrene–Carbon Nanotube Composites: Interaction Mechanisms, Preparation Methods, Structure, and Rheological Properties: A Review*. *Physchem*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/physchem5020014>

Zamudio, G. A. (2014). *Aplicaciones de las biopelículas comestibles en la industria alimentaria* [Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Alimentos, Universidad del Valle]. pdf.

Zhai, X., Zhang, X., Ao, H., Yin, Y., Li, X., & Ren, D. (2021). *Preparation and characterization of whey protein isolate/chitosan/microcrystalline cellulose composite films*. *Packaging Technology and Science*, 34(9), 589-599. <https://doi.org/10.1002/pts.2597>

Zhang, S., Cheng, X., Fu, Q., Li, Y., Wu, P., Qiao, Y., Yan, J., Si, L., Waterhouse, G. I. N., Li, H., & Ai, S. (2023). *Pectin-nanolignin composite films with water resistance, UV resistance, and antibacterial activity*. *Food Hydrocolloids*, 143, 108783. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108783>

ANEXO 1 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

DISEÑO DE MEZCLAS

Variable dependiente: ELONGACION

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	12	1718.394204	143.199517	19.34	<.0001

Error	26	192.510914	7.404266
Total correcto	38	1910.905118	

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para ELONGACION

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	26
Error de cuadrado medio	7.404266
Valor crítico del rango estudentizado	5.13931
Diferencia significativa mínima	8.0739

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
E	0.00	3	1
AB	18.819	3	2
E	0.00	3	3
ABCD	13.049	3	4
E	0.00	3	5
A	20.783	3	6
ABC	17.320	3	7
DE	7.665	3	8
BCD	10.820	3	9
DE	7.618	3	10
D	8.289	3	11
CD	9.850	3	12
BCD	11.572	3	13

Variable dependiente: RESISTENCIATENSION

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	12	1.55443253	0.12953604	121.25	<.0001
Error	26	0.02777733	0.00106836		
Total correcto	38	1.58220986			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para RESISTENCIATENSION

Alfa	0.05
------	------

Error de grados de libertad	26
Error de cuadrado medio	0.001068
Valor crítico del rango estudentizado	5.13931
Diferencia significativa mínima	0.097

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	0.61527	3	2
A	0.59920	3	6
B	0.40060	3	7
C	0.25140	3	4
CD	0.20047	3	12
CD	0.18547	3	13
CD	0.17497	3	9
DE	0.14733	3	11
DE	0.14333	3	10
EF	0.06173	3	8
F	0.0000	3	1
F	0.0000	3	3
F	0.0000	3	5

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Variable dependiente: HUMEDAD

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	451.6848436	150.5616145	65.65	<.0001
Error	16	36.6971678	2.2935730		
Total correcto	19	488.3820114			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HUMEDAD

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	16
Error de cuadrado medio	2.293573
Valor crítico del rango estudentizado	4.04609
Diferencia significativa mínima	2.7404

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey agrupamiento	Media	N	T
A	30.1214	5	150
B	26.9783	5	100
C	22.2818	5	50
D	17.5757	5	0

Variable dependiente: SOLUBILIDAD

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	7893.747152	2631.249051	82.27	<.0001
Error	16	511.730806	31.983175		
Total correcto	19	8405.477957			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para SOLUBILIDAD

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	16
Error de cuadrado medio	31.98318
Valor crítico del rango estudentizado	4.04609
Diferencia significativa mínima	10.233

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	74.211	5	0
AB	67.754	5	50
B	59.571	5	100
C	22.891	5	150

Variable dependiente: ESPESOR

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.00113872	0.00037957	19.83	0.0005
Error	56	0.00725787	0.00012960		
Total correcto	59	0.00839658			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para ESPESOR

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	56
Error de cuadrado medio	0.00013
Valor crítico del rango estudentizado	3.74475
Diferencia significativa mínima	0.011

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	0.156467	15	150
AB	0.155400	15	100
AB	0.151067	15	0
B	0.145400	15	50

Variable dependiente: LUMINOSIDAD

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr>F
Modelo	3	3.80745833	1.26915278	11.22	<.001
Error	56	6.33716000	0.11316357		
Total correcto	59	10.14461833			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para LUMINOSIDAD

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	56

Error de cuadrado medio 0.113164

Valor crítico del rango estudentizado 3.74475

Diferencia significativa mínima 0.3253

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	95.2000	15	0
B	94.8513	15	50
BC	94.7393	15	100
C	94.5007	15	150

Variable dependiente: a*

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	0.05494667	0.01831556	7.59	0.0002
Error	56	0.13509333	0.00241238		
Total correcto	59	0.19004000			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para a*

Alfa 0.05

Error de grados de libertad 56

Error de cuadrado medio 0.002412

Valor crítico del rango estudentizado 3.74475

Diferencia significativa mínima 0.0475

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	1.14933	15	150
AB	1.11267	15	100
B	1.09667	15	50
B	1.06533	15	0

Variable dependiente: b*

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	0.36024667	0.12008222	2.44	0.0734
Error	56	2.75082667	0.04912190		

Total correcto 59 3.11107333

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para b*

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 56
Error de cuadrado medio 0.049122
Valor crítico del rango estudentizado 3.74475
Diferencia significativa mínima 0.2143

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Tukey agrupamiento	Media	N	T
A	-2.88200	15	150
A	-2.93600	15	100
A	-3.00333	15	0
A	-3.08933	15	50

Variable dependiente: ERROR_COLOR

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	1.49423167	0.49807722	6.92	0.0005
Error	56	4.02846667	0.07193690		
Total correcto	59	5.52269833			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para ERROR_COLOR

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 56
Error de cuadrado medio 0.071937
Valor crítico del rango estudentizado 3.74475
Diferencia significativa mínima 0.2593

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	1.54200	15	0
B	1.22400	15	50
B	1.18333	15	100

B 1.14333 15 150

Variable dependiente: OPACIDAD

Fuente	DF	SC	CM	F-valor	Pr > F
Modelo	3	0.03654580	0.01218193	32.46	<.0001
Error	16	0.00600400	0.00037525		
Total correcto	19	0.04254980			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para OPACIDAD

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	16
Error de cuadrado medio	0.000375
Valor crítico del rango estudentizado	4.04609
Diferencia significativa mínima	0.0351

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Tukey agrupamiento	Media	N	T
A	0.46040	5	150
B	0.40900	5	100
BC	0.37800	5	50
C	0.34420	5	0

Variable dependiente: RTENSION

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.32813102	0.44271034	15.89	0.0010
Error	8	0.22282309	0.02785289		
Total correcto	11	1.55095411			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para RTENSION

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	8
Error de cuadrado medio	0.027853
Valor crítico del rango estudentizado	4.52880
Diferencia significativa mínima	0.4364

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	2.6719	3	50
A	2.3190	3	0
A	2.2940	3	100
B	2.7419	3	150

Variable dependiente: ELONGACION

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	567.9835486	189.3278495	7.11	0.0120
Error	8	213.0234677	26.6279335		
Total correcto	11	781.0070163			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para ELONGACION

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	8
Error de cuadrado medio	26.62793
Valor crítico del rango estudentizado	4.52880
Diferencia significativa mínima	13.492

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	21.960	3	150
B	6.675	3	0
B	6.166	3	100
B	5.467	3	50

Variable dependiente: MÓDULO YOUNG

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2410.005018	803.335006	18.67	0.0006
Error	8	344.182407	43.022801		
Total correcto	11	2754.187425			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para MÓDULO YOUNG

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	8
Error de cuadrado medio	43.0228
Valor crítico del rango estudentizado	4.52880
Diferencia significativa mínima	17.15

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	48.993	3	50
A	37.664	3	100
A	35.470	3	0
B	10.202	3	150

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T0
Nombre de lote: 1
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:

mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024	Hora: 05:32:18 p.
Tipo de Test: Tensión	Tpo: 0 s
Objetivo: 50.0 %	Mismo activador: Falso
Esperar t: 0 s	Velocidad: 1.00 mm/s
Carga Activación: 0.06 N	Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Vel. Test: 4.50 mm/s	Sonda: NONE
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s	Elemento: TA-DGA
Contador ciclos: 1.0	Celda Carga: 10000g
Target Type: Deformation %	

Resultados

Carga Media:	2.71	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	25.07	N
Deformación según Pico Fuerza:	2.32	mm
Trabajo:	145.00	mJ
Carga Final:	-0.31	N
Longitud de la muestra:	40.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T0
Nombre de lote: 2
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 11.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024	Hora: 05:35:24 p.
Tipo de Test: Tensión	Tpo: 0 s
Objetivo: 50.0 %	Mismo activador: Falso
Esperar t: 0 s	Velocidad: 1.00 mm/s
Carga Activación: 0.06 N	Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Vel. Test: 4.50 mm/s	Sonda: NONE
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s	Elemento: TA-DGA
Contador ciclos: 1.0	Celda Carga: 10000g
Target Type: Deformation %	

Resultados

Carga Media:	1.79	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	23.98	N
Deformación según Pico Fuerza:	3.10	mm
Trabajo:	222.20	mJ
Carga Final:	0.04	N
Longitud de la muestra:	40.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T0
 Nombre de lote: 3
 Ejemplo: 1
 Dimensiones:
 Forma: Bloque
 Longitud: 40.00 mm
 Anchura: 10.00 mm
 Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
 Tipo de Test: Tensión
 Objetivo: 50.0 %
 Esperar t: 0 s
 Carga Activación: 0.06 N
 Vel. Test: 4.50 mm/s
 Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
 Contador ciclos: 1.0
 Target Type: Deformation %

Hora: 05:45:50 p.
 Tpo. 0 s
 Mismo activador: Falso
 Velocidad: 1.00 mm/s
 Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
 Sonda: NONE
 Elemento: TA-DGA
 Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media: 0.24 N
 entre 0 y 0 s
 Pico Carga: 22.70 N
 Deformación según Pico Fuerza: 2.59 mm
 Trabajo: 213.30 mJ
 Carga Final: 0.02 N
 Longitud de la muestra: 40.00 mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T50
Nombre de lote: 1
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024	Hora: 05:49:43 p.
Tipo de Test: Tensión	Tpo: 0 s
Objetivo: 50.0 %	Mismo activador: Falso
Esperar t: 0 s	Velocidad: 1.00 mm/s
Carga Activación: 0.06 N	Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Vel. Test: 4.50 mm/s	Sonda: NONE
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s	Elemento: TA-DGA
Contador ciclos: 1.0	Celda Carga: 10000g
Target Type: Deformation %	

Resultados

Carga Media:	1.76	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	28.32	N
Deformación según Pico Fuerza:	2.32	mm
Trabajo:	172.60	mJ
Carga Final:	0.02	N
Longitud de la muestra:	40.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T50
Nombre de lote: 2
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 11.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:

mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha:	13/11/2024	Hora:	05:57:24 p.
Tipo de Test:	Tensión	Tpo:	0 s
Objetivo:	50.0 %	Mismo activador:	Falso
Esperar t:	0 s	Velocidad:	1.00 mm/s
Carga Activación:	0.06 N	Fr. Muestreo:	30.00 points/sec
Vel. Test:	4.50 mm/s	Sonda:	NONE
Velocidad Vuelta:	4.5 mm/s	Elemento:	TA-DGA
Contador ciclos:	1.0	Celda Carga:	10000g
Target Type:	Deformation %		

Resultados

Carga Media:	1.45	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	26.42	N
Deformación según Pico Fuerza:	2.19	mm
Trabajo:	236.30	mJ
Carga Final:	0.01	N
Longitud de la muestra:	40.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T50
Nombre de lote: 3
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador ciclos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:03:26 p.
Tpo: 0 s
Mismo activador: Falso
Velocidad: 1.00 mm/s
Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Sonda: NONE
Elemento: TA-DGA
Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media: 1.84 N
 entre 0 y 0 s
Pico Carga: 27.82 N
Deformación según Pico Fuerza: 2.05 mm
Trabajo: 267.10 mJ
Carga Final: 0.02 N
Longitud de la muestra: 40.00 mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T100
Nombre de lote: 1
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 41.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador ciclos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:22:53 p.
Tpo: 0 s
Mismo activador: Falso
Velocidad: 1.00 mm/s
Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Sonda: NONE
Elemento: TA-DGA
Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media:	1.78	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	23.86	N
Deformación según Pico Fuerza:	2.19	mm
Trabajo:	147.70	mJ
Carga Final:	-0.12	N
Longitud de la muestra:	41.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T100
Nombre de lote: 2
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 42.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:

mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador ciclos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:28:33 p.**Tpa:** 0 s**Mismo activador:** Falso**Velocidad:** 1.00 mm/s**Fr. Muestreo:** 30.00 points/sec**Sonda:** NONE**Elemento:** TA-DGA**Celda Carga:** 10000gResultados

Carga Media: 1.37 N
 entre 0 y 0 s
Pico Carga: 22.06 N
Deformación según Pico Fuerza: 2.77 mm
Trabajo: 141.90 mJ
Carga Final: 0.00 N
Longitud de la muestra: 42.00 mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T100
Nombre de lote: 3
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 42.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha:	13/11/2024	Hora:	06:34:59 p.
Tipo de Test:	Tensión	Tpo:	0 s
Objetivo:	50.0 %	Mismo activador:	Falso
Esperar t:	0 s	Velocidad:	1.00 mm/s
Carga Activación:	0.06 N	Fr. Muestreo:	30.00 points/sec
Vel. Test:	4.50 mm/s	Sonda:	NONE
Velocidad Vuelta:	4.5 mm/s	Elemento:	TA-DGA
Contador ciclos:	1.0	Celda Carga:	10000g
Target Type:	Deformation %		

Resultados

Carga Media:	0.75	N
	entre 0 y 0 s	
Pico Carga:	22.90	N
Deformación según Pico Fuerza:	2.50	mm
Trabajo:	285.20	mJ
Carga Final:	0.00	N
Longitud de la muestra:	42.00	mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T150
Nombre de lote: 1
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 9.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador ciclos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:06:50 p.
Tpo: 0 s
Mismo activador: Falso
Velocidad: 1.00 mm/s
Fr. Muestreo: 30.00 points/Sec
Sonda: NONE
Elemento: TA-DGA
Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media: 1.16 N
 entre 0 y 0 s
Pico Carga: 14.55 N
Deformación según Pico Fuerza: 10.96 mm
Trabajo: 243.10 mJ
Carga Final: 0.00 N
Longitud de la muestra: 40.00 mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T150
Nombre de lote: 2
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador ciclos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:14:03 p.
Tpo: 0 s
Mismo activador: Falso
Velocidad: 1.00 mm/s
Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Sonda: NONE
Elemento: TA-DGA
Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media: 1.60 N
 entre 0 y 0 s
Pico Carga: 17.17 N
Deformación según Pico Fuerza: 11.90 mm
Trabajo: 255.20 mJ
Carga Final: 0.00 N
Longitud de la muestra: 40.00 mm

INFORME DATOS

Descripción Muestra

Nombre: T150
Nombre de lote: 3
Ejemplo: 1
Dimensiones:
Forma: Bloque
Longitud: 40.00 mm
Anchura: 10.00 mm
Altura: 1.00 mm

Note:
 mezcla
 formulacion 4
 muestra 1

Método Test

Fecha: 13/11/2024
Tipo de Test: Tensión
Objetivo: 50.0 %
Esperar t: 0 s
Carga Activación: 0.06 N
Vel. Test: 4.50 mm/s
Velocidad Vuelta: 4.5 mm/s
Contador cidos: 1.0
Target Type: Deformation %

Hora: 06:16:57 p.
Tpo: 0 s
Mismo activador: Falso
Velocidad: 1.00 mm/s
Fr. Muestreo: 30.00 points/sec
Sonda: NONE
Elemento: TA-DGA
Celda Carga: 10000g

Resultados

Carga Media: 1.25 N
 entre 0 y 0 s
Pico Carga: 18.92 N
Deformación según Pico Fuerza: 4.16 mm
Trabajo: 253.30 mJ
Carga Final: 0.00 N
Longitud de la muestra: 40.00 mm

Variable dependiente: WVP

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.990917E-21	6.636389E-22	0.86	0.5022
Error	8	6.208E-21	7.76E-22		
Total correcto	11	8.198917E-21			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para WVP

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	8
Error de cuadrado medio	7.76E-22
Valor crítico del rango estudentizado	4.52880
Diferencia significativa mínima	73E-12

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	2.5367E-10	3	4
A	2.4367E-10	3	2
A	2.38E-10	3	1
A	2.1833E-10	3	3

ANÁLISIS ANTIMICROBIANO

Por filas

Variable dependiente: HALO (T100, 12 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	0.09975556	0.04987778	1.00	0.4219
Error	6	0.29926667	0.04987778		
Total correcto	8	0.39902222			

Variable dependiente: HALO (T150, 12 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	1.82660000	0.91330000	4.21	0.0722
Error	6	1.30300000	0.21716667		
Total correcto	8	3.12960000			

Variable dependiente: HALO (control positivo, 12 h)

Fuente	GL	SC	CM.	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	37.39	18.694	7.82	0.002
Error	33	78.92	2.391		
Total correcto	35	116.31			

Prueba del rango estudentizado para HALO

B	N	Media	Tukey Agrupamiento
S	12	4.667	A
E	12	4.000	A
L	12	2.250	B

Por filas

Variable dependiente: HALO (T50, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	0.10888889	0.05444444	1.00	0.4219
Error	6	0.32666667	0.05444444		
Total correcto	8	0.43555556			

Variable dependiente: HALO (T100, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	0.22222222	0.11111111	0.50	0.6297
Error	6	1.33333333	0.22222222		
Total correcto	8	1.55555556			

Variable dependiente: HALO (T150, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	1.78880000	0.89440000	4.03	0.0776
Error	6	1.33040000	0.22173333		
Total correcto	8	3.11920000			

Variable dependiente: HALO (control positivo, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Moledo	2	6.09722222	3.04861111	5.49	0.0442
Error	6	3.33333333	0.55555556		

Total correcto 8 9.43055556

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HALO

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 6
Error de cuadrado medio 0.555556
Valor crítico del rango estudentizado 4.33902
Diferencia significativa mínima 1.8672

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	B
A	4.7500	3	S
A	4.3333	3	E
B	2.8333	3	L

Por columnas

Variable dependiente: HALO (E-COLI, 12 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	5	38.02666667	7.605333333	117.26	<.0001
Error	12	0.778333333	0.06486111		
Total correcto	17	38.80500000			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HALO

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 12
Error de cuadrado medio 0.064861
Valor crítico del rango estudentizado 4.75015
Diferencia significativa mínima 0.6985

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	4.0000	3	Positivo
B	2.7667	3	150
C	1.2333	3	100

C	1.0000	3	50
D	0.0000	3	Negativo
D	0.0000	3	0

Variable dependiente: HALO (E-COLI, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	5	43.13611111	8.62722222	89.25	<.0001
Error	12	1.16000000	0.09666667		
Total correcto	17	44.29611111			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para halo

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	0.096667
Valor crítico del rango estudentizado	4.75015
Diferencia significativa mínima	0.8527

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	4.3333	3	Positivo
B	2.7667	3	150
C	1.3333	3	100
C	1.0000	3	50
D	0.0000	3	Negativo
D	0.0000	3	0

Variable dependiente: HALO (SALMONELLA, 12 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	5	45.43211111	9.08642222	38.01	<.0001
Error	12	2.86873333	0.23906111		
Total correcto	17	48.30084444			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HALO

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	0.239061

Valor crítico del rango estudentizado 4.75015

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey agrupamiento	Media	N	T
A	4.6667	3	Positivo
B	1.8867	3	150
BC	1.0000	3	100
BC	1.0000	3	50
C	0.0000	3	2
C	0.0000	3	Negativo

Variable dependiente: HALO (SALMONELLA, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	5	47.07002778	9.41400556	54.39	<.0001
Error	12	2.07706667	0.17308889		
Total correcto	17	49.14709444			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para halo

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	0.173089
Valor crítico del rango estudentizado	4.75015
Diferencia significativa mínima	1.141

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	4.7500	3	Positivo
B	1.8867	3	150
BC	1.0000	3	100
BC	1.0000	3	50
C	0.0000	3	Negativo
C	0.0000	3	0

Variable dependiente: HALO (LISTERIA, 12 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
--------	----	----	----	---------	--------

Modelo	5	12.45069444	2.49013889	7.38	0.0023
Error	12	4.05166667	0.33763889		
Total correcto	17	16.50236111			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HALO

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	0.337639
Valor crítico del rango estudentizado	4.75015
Diferencia significativa mínima	1.5936

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	2.2500	3	Positivo
A	1.7667	3	150
AB	1.0000	3	100
AB	1.0000	3	50
B	0.0000	3	Negativo
B	0.0000	3	0

Variable dependiente: HALO (LISTERIA, 24 h)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	5	17.66277778	3.53255556	13.73	0.0001
Error	12	17.66277778	0.25722222		
Total correcto	17	20.74944444			

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para HALO

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	0.257222
Valor crítico del rango estudentizado	4.75015
Diferencia significativa mínima	4.75015

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
--------------------	-------	---	---

A	2.8333	3	Positivo
Ab	1.7667	3	150
BC	1.3333	3	100
BC	1.2333	3	50
C	0.0000	3	Negativo
C	0.0000	3	0

EDX

Variable dependiente: CARBONO (% PESO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1007.8	335.9	2.74	0.135
Error	6	734.7	122.5		
Total correcto	9	1742.6			

Variable dependiente: OXÍGENO (% PESO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1256.6	418.9	2.61	0.146
Error	6	963.0	160.5		
Total correcto	9	2219.6			

Variable dependiente: CALCIO (% PESO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	43.417	14.472	8.86	0.013
Error	6	9.796	1.633		
Total correcto	9	53.212			

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	6.535	3	150
B	2.783	3	100
B	2.667	3	50
B	0.0000	1	0

Variable dependiente: CARBONO (% ATÓMICO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1124.4	374.8	2.61	0.147
Error	6	862.9	143.8		
Total correcto	9	1987.3			

Variable dependiente: OXÍGENO (% ATÓMICO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1211.8	403.9	2.57	0.150
Error	6	943.5	157.3		
Total correcto	9	2155.3			

Variable dependiente: OXÍGENO (% ATÓMICO)

Fuente	DF	SC	CM	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	4.9991	1.6664	10.10	0.009
Error	6	0.9898	0.1650		
Total correcto	9	5.9888			

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	T
A	2.19191	3	150
B	0.96500	3	100
B	0.81600	3	50
B	0.0000	1	0