



**UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

ÁREA TEMÁTICA: BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

**EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODIFICACIÓN POR
ACETILACIÓN DEL MUCÍLAGO DE *Opuntia atropes* Y SU APLICACIÓN
EN UN YOGURT BAJO EN GRASA**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

QFB. JAQUELYN ALVAREZ MARÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES



DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en cada paso de este camino. Por darme la vida, la salud y la oportunidad de crecer a través de cada reto, y por recordarme siempre que los tiempos son perfectos y sus propósitos aún más.

A mis padres, por ser el pilar más sólido de mi vida. Por su amor incondicional, por creer en mí incluso en los momentos en que yo misma dudaba, por acompañarme en cada etapa, en cada desvelo y en cada esfuerzo. Gracias por impulsarme a seguir adelante, por enseñarme a encontrar luz incluso en los momentos difíciles y por darme siempre un hogar al cual volver, donde todo es calma y felicidad.

A mis hermanas, por su amor constante, por su compañía y por recordarme siempre que no camino sola. Por estar presentes en cada logro y en cada aprendizaje.

A mi familia en general, por su apoyo, su cercanía y por ser un recordatorio siempre de lo que verdaderamente importa.

A mi compañero de vida, por caminar a mi lado durante este proceso, por su amor, su paciencia y su entrega. Por ser una luz en los días difíciles, por acompañarme incluso en los momentos más exigentes, por creer en mí y recordarme siempre de lo que soy capaz.

Y finalmente, a mí misma, por no rendirme. Por sostenerme en los días de incertidumbre, por confiar en mi vocación, por perseverar con determinación y por tener el valor de llegar hasta aquí. Este logro es testimonio de que los sueños, cuando se acompañan de disciplina, amor y propósito, se convierten en realidad.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida, porque sin ellos esto no hubiese sido posible. A mis padres, por su amor infinito, por acompañarme en cada etapa de este camino, por sostenerme en los momentos difíciles y por compartir conmigo cada logro y cada aprendizaje. Por su paciencia, sus palabras de aliento y por enseñarme el valor de la perseverancia, determinación y confianza. A mis hermanas, por su amor, por su apoyo y por estar siempre presentes. A mis sobrinos, por recordarme, con su alegría, la belleza de los momentos sencillos. Y a mi familia en general, por su cercanía, por su confianza y por ser siempre una fuente de fortaleza.

De manera muy especial, a mi compañero de vida, por caminar a mi lado durante este proceso. Por su amor, su paciencia y su presencia incondicional. Por acompañarme en cada etapa, por compartir tanto los momentos de incertidumbre como los de logro, por brindarme su apoyo constante y por motivarme siempre, así como por ser apoyo, calma y fortaleza para mí. Por su compañía, por su cuidado, por su confianza en mí y por recordarme, incluso en los momentos más desafiantes, que era posible seguir adelante. Su presencia, amor y apoyo hizo este camino más ligero, más bonito, más significativo y profundamente valioso.

A mi asesor de tesis y a los integrantes de mi comité sinodal, por su orientación, tiempo y valiosas observaciones a lo largo de este proceso, las cuales contribuyeron al fortalecimiento de este trabajo y a mi formación como profesionista y como investigadora.

Al Laboratorio de Investigación en Desarrollo de Alimentos (LIDA), por brindarme el espacio, los recursos y el entorno académico que hicieron posible la realización de este trabajo. A mis compañeros y amigos de laboratorio, por su generosidad al compartir conocimientos, por su disposición para ayudar, por las conversaciones que enriquecieron este camino y por los momentos que hicieron del laboratorio un lugar no solo de trabajo, sino también de aprendizaje, crecimiento y buena compañía. Porque la ciencia también se construye en comunidad, en el intercambio de ideas y en el apoyo mutuo.

A mis amigos en general, por su compañía y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa. Por estar presentes, por escuchar, por animarme y por recordarme, incluso en los momentos más agotadores, la importancia de mantener el equilibrio, la confianza y la motivación. Por brindarme momentos de alegría, calma y fortaleza que hicieron este camino más llevadero.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, por brindarme la oportunidad de formar parte de este programa y proporcionarme las herramientas académicas, científicas y humanas que contribuyeron a mi formación como investigadora.

Al Campus Morelia de la Universidad Autónoma Chapingo (CRUCO), por permitirme realizar la recolección del material vegetal que constituyó la base de esta investigación. Asimismo, al Laboratorio de Espectroscopía de Absorción Atómica del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, y al Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Nanomateriales, ambos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme sus puertas y brindarme el apoyo necesario para la realización de análisis fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado, el cual hizo posible mi dedicación total a esta etapa de formación académica.

I. CONTENIDO

I.	ÍNDICE DE TABLAS.....	8
II.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
1.	RESUMEN.....	10
2.	ABSTRACT.....	11
3.	INTRODUCCIÓN.....	12
4.	ANTECEDENTES.....	14
4.1	Características y Distribución Geográfica de <i>Opuntia spp.</i> en México	14
4.1.1	Composición del nopal	15
4.2	Localización anatómica del mucílago	16
4.2.1	Función del mucílago en la planta.....	17
4.2.2	Factores que afectan el rendimiento del mucílago	17
4.2.3	Composición del mucílago de nopal.....	18
4.3	Gomas y mucílagos en la industria alimentaria.....	19
4.4	Modificaciones en polisacáridos	22
4.4.1	Modificación física.....	22
4.4.2	Modificación química.....	23
4.5	Yogurt.....	23
4.5.1	Composición nutricional del yogurt	24
4.5.2	Uso de hidrocoloides en el yogurt	24
5.	JUSTIFICACIÓN.....	25
6.	HIPÓTESIS.....	25
7.	OBJETIVO GENERAL	25
8.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	25
9.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27

9.1 Extracción de mucílago de <i>Opuntia atropes</i>	27
9.2 Modificación química del mucílago de <i>Opuntia atropes</i> por acetilación	27
9.2.1 Grupos acetilo y grado de sustitución.....	28
9.3 Caracterización del mucílago nativo y acetilado	29
9.3.1 pH	29
9.3.2 Color	29
9.3.3 Actividad de agua (Aw).....	30
9.3.4 Capacidad de absorción de agua (WAC).....	30
9.3.5 Capacidad de absorción de aceite (OAC).....	30
9.3.6 Viscosidad	31
9.3.7 Determinación del contenido de proteína.....	31
9.3.8 Determinación del contenido de cenizas	32
9.3.9 Análisis del contenido de calcio en los mucílagos	32
9.3.10 Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	33
9.4 Elaboración del yogurt.....	33
9.5 Caracterización fisicoquímica del yogurt	33
9.5.1 pH del yogurt	34
9.5.2 Color del yogurt.....	35
9.5.3 Actividad de agua del yogurt.....	35
9.5.4 Viscosidad del yogurt	35
9.5.5 Grado de sinéresis.....	35
9.5.6 Determinación de acidez del yogurt	36
10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	36
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
11.1 Extracción de Mucílago de <i>Opuntia atropes</i>	37
11.2 Modificación química del mucílago de <i>Opuntia atropes</i> por acetilación, grupos acetilo y grado de sustitución	38
11.3 Caracterización de los mucílagos nativo y acetilados al 1.78 % y 2.28 %.....	39
11.3.1 pH	39

11.3.2 Color	40
11.3.3 Actividad de agua (Aw).....	43
11.3.4 Capacidad de absorción de agua (WAC).....	44
11.3.5 Capacidad de absorción de aceite (OAC).....	45
11.3.7 Determinación del contenido de proteína.....	48
11.3.8 Determinación del contenido de cenizas	49
11.3.9 Análisis del contenido de calcio en los mucílagos	50
11.3.10 Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) ..	52
11.4 Caracterización fisicoquímica de los yogures	55
11.4.1 pH de los yogures	55
11.4.2 Color de los yogures	56
11.4.3 Actividad de agua de los yogures	59
11.4.4 Viscosidad de los yogures	60
11.4.5 Grado de sinéresis de los yogures.....	61
11.4.6 Determinación de acidez de los yogures	62
12. <i>CONCLUSIONES</i>	65
13. <i>REFERENCIAS</i>	66

I. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rendimiento del mucílago de cinco especies del género <i>Opuntia</i>	22
Tabla 2. Rendimiento promedio en la extracción del mucílago de <i>Opuntia atropes</i>	37
Tabla 3. Rendimientos, porcentaje de acetilación y grado de sustitución de los mucílagos acetilados de <i>Opuntia atropes</i>	38
Tabla 4. Valores de pH de los mucílagos nativo y acetilados de <i>Opuntia atropes</i> obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.	40
Tabla 5. Valores del modelo CIELAB para los mucílagos nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i> obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago..	41
Tabla 6. Actividad de agua de los mucílagos nativo y modificados en polvo de <i>Opuntia atropes</i> obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago..	43
Tabla 7. Capacidad de absorción de agua del mucílago nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i> obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago..	44
Tabla 8. Capacidad de absorción de aceite (OAC) del mucílago nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i>	45
Tabla 9. Evaluación de la viscosidad de los mucílagos nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i> a 100 rpm.	47
Tabla 10. Porcentaje de proteína de los mucílagos nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i>	48
Tabla 11. Porcentaje de cenizas de los mucílagos nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i>	49
Tabla 12. Concentración de calcio en los mucílagos nativo y modificados de <i>Opuntia atropes</i> determinados por espectrometría de absorción atómica con llama.	50
Tabla 13. Valores de pH de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.....	55
Tabla 14. Valores del modelo CIELAB para las distintas formulaciones de los yogures elaborados.....	57
Tabla 15. Actividad de agua de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.	59
Tabla 16. Evaluación de la viscosidad (10 rpm) de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.	60

Tabla 17. Porcentaje de sinéresis de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

.....62

Tabla 18. Porcentaje de acidez de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.63

II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo CIELAB para evaluar los parámetros de color L, a, b, Chroma y Hue. ..41

Figura 2. Espectros FTIR del mucílago nativo (MN) y del mucílago acetilado al 1.78 % (MA4) y 2.28 % (MA2) de *Opuntia atropes*, obtenidos mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.52

1. RESUMEN

El mucílago de cladodios del nopal, específicamente de *Opuntia atropes*, es un polisacárido vegetal con propiedades tecnofuncionales interesantes para su aplicación como ingrediente natural en alimentos. El objetivo de esta investigación fue extraer, modificar químicamente por acetilación y caracterizar al mucílago, así como evaluar su incorporación en una matriz tipo yogurt bajo en grasa. La extracción se realizó empleando una relación agua:nopal de 4:1 y alcohol:mucílago de 3:1; la modificación química se realizó con anhídrido acético, obteniendo porcentajes de acetilación de 1.78 % y 2.28 %. Se evaluaron propiedades fisicoquímicas como pH, actividad de agua, viscosidad, color y capacidades de absorción de agua y aceite, y se realizó caracterización estructural por FTIR. El mucílago acetilado al 1.78 % mostró el comportamiento más favorable, reflejado en una menor viscosidad del mucílago y en una menor sinéresis del yogurt, sin alterar pH ni acidez. La acetilación también favoreció la disminución de la actividad de agua e incrementó la absorción de agua, manteniendo una adecuada absorción de aceite. Estos resultados indican que la modificación química del mucílago favorece su estabilidad y funcionalidad tecnológica, respaldando su uso como ingrediente funcional en alimentos fermentados bajos en grasa.

Palabras clave: Acetilación; Ingrediente funcional; Modificación química; Mucílago de *Opuntia atropes*; Nopal; Propiedades fisicoquímicas; Yogurt.

2. ABSTRACT

The mucilage from cladodes of nopal, specifically from *Opuntia atropes*, is a plant-based polysaccharide with techno-functional properties that support its application as a natural food ingredient. The objective of this study was to extract, chemically modify by acetylation, and characterize the mucilage, as well as to evaluate its incorporation into a low-fat yogurt-type matrix. Extraction was carried out using a water:nopal ratio of 4:1 and an alcohol:mucilage ratio of 3:1; chemical modification was performed using acetic anhydride, yielding acetylation percentages of 1.78 % and 2.28 %. Physicochemical properties including pH, water activity, viscosity, color, and water and oil absorption capacities were evaluated, and structural characterization was performed using FTIR spectroscopy. The mucilage acetylated at 1.78 % showed the most favorable behavior, reflected in lower mucilage viscosity and reduced yogurt syneresis, without altering pH or acidity. Acetylation also promoted a decrease in water activity and increased water absorption capacity, while maintaining adequate oil absorption. These results indicate that chemical modification enhances the stability and techno-functional performance of the mucilage, supporting its use as a functional ingredient in low-fat fermented foods.

Keywords: Acetylation; Chemical modification; Functional ingredient; *Opuntia atropes* mucilage; Physicochemical properties; Yogurt.

3. INTRODUCCIÓN

La alimentación ha ido evolucionando con el objetivo de satisfacer necesidades básicas para garantizar el bienestar y la salud de las personas, con un creciente interés en alimentos que ofrezcan beneficios adicionales a su valor nutritivo. En este contexto, el nopal, nativo de México, ha sido utilizado desde la época prehispánica como alimento y medicina, destacándose por su versatilidad y valor nutricional (Secretaría Nacional De Inspección y Certificación de Semillas, 2017; Torres-Ponce *et al.*, 2015).

El nopal es una fuente importante de fibra, así como de vitaminas y minerales esenciales para la salud. Entre sus componentes destacan las vitaminas A y C, además de minerales como calcio, potasio y magnesio, los cuales contribuyen a diversas funciones biológicas como el fortalecimiento del sistema inmunológico, mejoramiento de la digestión y mantenimiento de la salud ósea (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Su elevado contenido de fibra se ha asociado con efectos hipoglucemiantes, lo que favorece la regulación de los niveles de glucosa en sangre y respalda su uso en la prevención y manejo de la diabetes (IMSS, 2018).

El nopal tiene un alto potencial en la industria alimentaria debido a su contenido de compuestos bioactivos y tecnofuncionales. Entre estos destacan los compuestos fenólicos, los cuales han sido asociados con diversas actividades biológicas, incluyendo efectos antioxidantes, hipoglucemiantes y anticancerígenos. Asimismo, contiene polisacáridos estructurales como el mucílago, que ha sido empleado en aplicaciones tecnológicas como la elaboración de mermeladas y como alternativa a agentes gelificantes en productos alimentarios (Ponce-Luna *et al.*, 2023; Torres-Ponce *et al.*, 2015).

El mucílago de nopal (*Opuntia spp.*) ha ganado interés en la industria alimentaria por sus propiedades funcionales. Según Rodríguez-González *et al.* (2014) y Martínez y Garnica (2021), este biopolímero presenta una compleja composición rica en azúcares y ácidos urónicos, lo que le permite formar geles viscosos y retener agua y lípidos, características útiles para alimentos dirigidos a personas con diabetes o dislipidemias.

Diversos estudios han evaluado el uso del mucílago de nopal como aditivo en productos lácteos, reportando mejoras en la viscosidad y textura del yogurt (Herrera-Enciso *et al.*, 2021). Por otra parte, investigaciones como las realizadas por Rodríguez-González *et al.* (2014) y Zavala (2012) se han enfocado en optimizar la extracción del mucílago,

evaluando diferentes especies de nopal y condiciones de proceso con el fin de aumentar su rendimiento.

En este contexto, el mucílago de nopal representa una alternativa viable para el desarrollo de alimentos funcionales, debido a su capacidad de aportar propiedades tecnológicas y sustituir parcialmente agentes gelificantes o espesantes convencionales, aprovechando al máximo los recursos disponibles en Michoacán. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue modificar químicamente el mucílago de nopal mediante acetilación para mejorar sus propiedades funcionales y evaluar su incorporación en una matriz tipo yogurt bajo en grasa.

4. ANTECEDENTES

El género *Opuntia spp.* pertenece a la familia de las *Cactaceae* e incluye diversas especies comúnmente conocidas como nopal, las cuales se caracterizan por ser de color verde, tener espinas a su alrededor y estar compuestas por una estructura formada por cladodios, más comúnmente conocidos como pencas. A nivel mundial se han descrito más de 300 especies de este género, que poseen un mecanismo de captura de dióxido de carbono (CO₂) llamado metabolismo ácido de las crasuláceas, el cual implica que los estomas permanezcan abiertos durante la noche, cuando la temperatura es más baja y la humedad relativa es más alta que durante el día. Esto permite captar el CO₂ de manera más eficiente y reducir la pérdida del agua. Estas adaptaciones fisiológicas, junto con los cambios anatómicos y morfológicos, han permitido al nopal desarrollarse y permanecer en ambientes áridos y semiáridos, lo que explica su alta tolerancia a la sequía (Flores-Valdez, 2003; Luna-Zapién, 2023).

4.1 Características y Distribución Geográfica de *Opuntia spp.* en México

Las especies de *Opuntia*, conocidas en México como nopal, fueron componentes importantes de la dieta humana durante los tiempos preagriculturales. México es el principal productor de *Opuntia*. Más de 50 de estas especies son usadas como alimento y materia prima para elaborar medicina, 20 especies son cultivadas con diferentes grados de domesticación (Chávez-Moreno *et al.*, 2009). El género *Opuntia* (*Cactaceae: Opuntioideae*) incluye 250 especies de acuerdo con Britton y Rose (1963). Un total de 104 especies de *Opuntia* ha informado Bravo-Hollis y Sanchez-Mejorada (1978) y 83 de acuerdo con Guzmán *et al.* (2003), se encuentran en México, donde cerca de la mitad de las especies del género son endémicas (Anderson, 2001; Britton y Rose, 1963).

La distribución geográfica del género *Opuntia* comprende áreas áridas a nivel del mar hasta lugares de gran altitud como los Andes en Perú; desde regiones tropicales de México con temperaturas siempre superiores a los 5 °C, hasta zonas de Canadá donde en invierno pueden descender hasta -40 °C. Debido a su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones climáticas, las especies del género *Opuntia* pueden considerarse un recurso genético importante para distintos ecosistemas (Sáenz *et al.*, 2006).

La anatomía y morfología del género *Opuntia* presentan adaptaciones que favorecen su desarrollo en condiciones ambientales adversas, lo que permite su crecimiento en regiones donde otras especies presentan limitaciones para su desarrollo.

Las cualidades que les permiten adaptarse a entornos áridos están relacionadas con la estructura de varios de sus órganos. Por ejemplo, sus raíces superficiales y extensas son capaces de absorber el agua de las escasas precipitaciones que ocurren en dichos ambientes (Nobel, 1998).

El nopal exhibe características ecofisiológicas únicas que le permiten sobrevivir en entornos adversos, como su reproducción asincrónica y adaptaciones estructurales tales como una baja densidad estomática y una cutícula gruesa. Estas características permiten considerar a *Opuntia* como una especie adecuada para programas de reforestación, ya que puede desarrollarse en suelos poco fértiles que no resultan aptos para otros cultivos (Torres-Ponce, 2015).

Desde un punto de vista morfológico, las especies del género *Opuntia* presentan diversas formas de crecimiento, que pueden variar desde estructuras rastreras hasta formas frutescentes o arborescentes. Una característica distintiva de este género es la modificación de sus hojas en espinas, lo cual representa una adaptación propia de las cactáceas; sin embargo, algunas especies pueden presentar hojas verdaderas durante etapas tempranas de desarrollo. Las hojas del nopal se componen de dos capas distintas: una capa externa de células verdes (clorénquima) y otra interna de células blancas (parénquima), con células especializadas que almacenan mucílago (Ponce-Luna *et al.*, 2023; Torres-Ponce, 2015).

En Michoacán se encuentran poblaciones tanto de nopales cultivados como silvestres. Para el año 2009, los cultivos de nopal ocuparon una superficie aproximada de 308 hectáreas en la región. Las especies cultivadas predominantes incluyen *Opuntia atropes* y *Opuntia tomentosa*. Mientras que, además de las mencionadas anteriormente (*O. atropes* y *O. tomentosa*), se encuentran *Opuntia robusta*, *Opuntia fuliginosa*, *Opuntia joconostle*, *Opuntia streptacantha* y *Opuntia jaliscana* (Portillo *et al.*, 2021).

4.1.1 Composición del nopal

De las más de 300 especies del género *Opuntia*, solo de 10 a 12 especies se han aprovechado para uso humano, consumiéndose tanto su fruto (tuna) como el cladodio entero (penca) y el

cladodio picado (nopalitos). También se emplea en alimentación animal (ganado vacuno y ovino) como forraje e industrialmente para obtener alcohol, colorantes (cochinilla), jabón, pectinas y aceites. Además de su valor nutricional y utilidad industrial, el nopal posee propiedades medicinales, incluyendo un efecto hipoglucemiante que lo hace relevante en el campo de la salud (Torres-Ponce, 2015).

La composición química del nopal varía y está influenciada por diversos factores como la especie, la edad del cladodio, el año de cosecha, las condiciones climáticas, el tipo de suelo y si es cultivado de manera natural o en invernadero (Torres-Sales, 2011). Debido a sus adaptaciones para sobrevivir en ambientes áridos, el nopal presenta bajos niveles de materia seca y proteína cruda, y valores medios de Fibra Detergente Neutra (FDN) y Fibra Detergente Ácida (FDA). Su gran valor radica en sus altos niveles de carbohidratos no estructurales y materia mineral (Torres-Sales, 2011).

En otros países como Etiopía, los nopales son vistos como un elemento esencial para la vida, ya que tanto los tallos que almacenan agua en grandes cantidades como los frutos, son utilizados como alimento para que el ganado pueda sobrevivir durante períodos de sequía. Esto permite a los ganaderos disponer de alimento, lo que contribuye significativamente a la supervivencia de ambas partes involucradas (SAERT, 1994).

Es importante tener en cuenta que la composición del cladodio de nopal varía dependiendo de su estado de maduración. Independientemente de la edad, siempre presenta niveles elevados de cenizas, fibra y proteína. Sin embargo, a lo largo del proceso de envejecimiento, se observa una disminución en los niveles de proteína y cenizas, mientras que los niveles de lípidos y fibra tienden a aumentar (Portillo *et al.*, 2021).

Se ha reportado un rango de valores para fibra dietética total de 43.64 % a 69.36 %, fibra insoluble de 23.21 % a 55.15 %, cenizas de 18.06 % a 25.33 %, fibra soluble de 6.36 % a 17.61 %, proteína de 3.12 % a 6.00 %, extracto libre de nitrógeno de 2.92 % a 31.56 %, y lípidos de 1.21 % a 1.94 % para especies de los géneros *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa* (Martínez y Garnica, 2021).

4.2 Localización anatómica del mucílago

El mucílago se acumula en las células mucilaginosas que están presentes en las raíces, cladodios, flores y frutos de las plantas del género *Opuntia*. La mayoría de estas células

mucilaginosas se encuentran en los cladodios, de manera particular en el parénquima o hidrénquima (reserva de agua), y en menor proporción en el clorénquima (tejido fotosintético). En estas células, el mucílago se produce en el aparato de Golgi, y es generado por los dictiosomas y se almacena en vesículas que se transportan fuera del protoplasto y se liberan al exterior de la célula a través de la fusión de las vesículas con la membrana plasmática (proceso de secreción granulocrina). Las células mucilaginosas cuentan con una pared primaria que se adelgaza y compacta para evitar la filtración del material mucilaginoso hacia los espacios intercelulares. Cuando el mucílago se acumula en la célula, el protoplasto se contrae y colapsa, y todo el volumen celular es ocupado por el mucílago (Luna-Zapién, 2023).

4.2.1 Función del mucílago en la planta

El mucílago se produce en la planta para almacenar agua a través de la liberación de polisacáridos en los espacios fuera de las células. Esta reserva de agua se emplea en periodos de sequía en el suelo; además, el mucílago desempeña un papel crucial en el equilibrio iónico de las células vegetales, la resistencia a las heladas, el transporte de agua, la respuesta a lesiones en los tejidos vegetales, en las interacciones planta-patógeno, y como reservorio de carbohidratos. Aparte de su función como reserva hídrica, el mucílago tiene un papel relevante en la dispersión de las semillas, ya que estas se adhieren al suelo, reduciendo su desplazamiento por el agua y los depredadores. La absorción de agua por la semilla incrementa su contacto con el sustrato y, en ciertas especies, facilita la germinación, especialmente en condiciones de sequía (Flores-Valdez, 2003; Luna-Zapién, 2023).

4.2.2 Factores que afectan el rendimiento del mucílago

La cantidad y la composición del mucílago en *Opuntia* pueden variar debido a diversos factores como la especie, la edad de los cladodios, la temperatura y tipo de aire, y pH del suelo. A medida que los cladodios maduran, la cantidad de mucílago disminuye. Sin embargo, en algunas especies, se ha observado un aumento en el contenido de mucílago cuando la temperatura cambia, por ejemplo, de 30/20 °C a 10/0 °C en ciclos diurno y nocturno, respectivamente (Luna-Zapién, 2023).

Además, el contenido de mucílago en los cladodios tiende a aumentar en respuesta a la sequía, lo que puede ser una defensa de la planta ante condiciones adversas. También se ha notado que la viscosidad del mucílago varía según la cantidad de agua que recibe la planta, aumentando cuando las plantas se cultivan en zonas con poca precipitación, lo que puede ser significativo bajo condiciones en las que hay poca agua en el suelo (Luna-Zapién, 2023).

4.2.3 Composición del mucílago de nopal

El mucílago del nopal es un carbohidrato complejo generado por plantas de la familia *Cactaceae* con una gran capacidad para retener agua. Investigadores destacan su utilidad en la industria alimentaria como hidrocoloide. Se sugiere su uso como agente encapsulante, gelificante, modificador de textura y viscosidad, y estabilizador de espumas, entre otras aplicaciones. Además, al ser de origen vegetal, tiene una percepción positiva entre los consumidores (García, 2017).

El mucílago de nopal puede comportarse como una pectina de bajo grado de esterificación, capaz de formar geles a pH neutro en presencia de Ca^{2+} (calcio). Este proceso ocurre mediante un doble mecanismo que incluye la formación de enlaces iónicos entre cadenas de polisacáridos, descrito bajo el modelo de “caja de huevos”, así como la formación de una segunda red termorreversible asociada a estructuras helicoidales (Cárdenas y Goycoolea, 2001).

El mucílago es un componente de la fibra soluble del nopal y es un polisacárido altamente ramificado con azúcares mezclado con ácidos urónicos. Cada molécula de mucílago de *O. ficus-indica* puede contener hasta más de 30,000 subunidades de azúcar. El mucílago se compone de aproximadamente 35 % a 40 % de arabinosa, 20 % a 25 % de galactosa, 20 % a 25 % de xilosa, 7 % a 8 % de ramnosa, y 7 % a 8 % de ácido galacturónico. La molécula de mucílago se caracteriza por poseer una fuerte carga negativa, ya que los iones hidrógeno tienden a disociarse de la parte carboxílica, de las subunidades galacturónicas (Gibson y Nobel, 1990).

La estructura de la molécula de mucílago consiste en residuos alternados de ramnosa y ácido galacturónico, los cuales están unidos a los lados con cadenas compuestas de tres residuos de galactosa. Los residuos de arabinosa y xilosa están ramificados en los lados de las cadenas de galactosa; la xilosa parece estar unida a arabinosa, la cual a su vez está ligada

a la galactosa. Algunas cadenas de galactosa tienen unidas a los lados arabinosa pero no xilosa, y algunas tienen una xilosa con dos residuos de arabinosa. Esta estructura representa solo una pequeña porción de molécula del mucílago, porque la unidad completa de la molécula es repetida unas 500 veces. El mucílago de otras especies de *Opuntia* está compuesto por los mismos residuos de azúcares, aunque en diferentes porcentajes que *O. ficus-indica* (Gibson y Nobel, 1990).

El método y las condiciones de extracción afectan significativamente la composición y la cantidad de mucílago obtenido. Por esto, se han estudiado alternativas para reducir principalmente los costos de extracción y menor uso de solventes. También se ha reportado el uso del mucílago de *Opuntia* como aditivo en la industria de alimentos poco procesados (Luna-Zapién, 2023).

4.3 Gomas y mucílagos en la industria alimentaria

Existe gran variedad de aditivos alimentarios que confieren propiedades de viscosidad, espesamiento, gelificación, entre otros, los cuales se agrupan bajo el término hidrocoloides. Éstos incluyen tanto proteínas (como la clara de huevo y la gelatina) como polisacáridos (almidones, agar, alginatos, goma arábica y pectinas) y generalmente, este término se reserva para fibras con alta capacidad de retener agua. De acuerdo con el Codex Alimentarius (FAO/OMS), los hidrocoloides son reconocidos y regulados como aditivos alimentarios dentro de las categorías funcionales de espesantes, gelificantes, estabilizantes o emulsionantes. En la legislación de la Unión Europea estos compuestos se identifican con la letra E seguida de un número de tres dígitos, conforme al Reglamento (CE) N° 1333/2008 sobre aditivos alimentarios, donde se encuentran listados y autorizados para su uso en alimentos (Tech, 2022).

La mayor parte de los hidrocoloides provienen de fuentes vegetales y consisten en porciones de fibras purificadas que han sido sometidas a diversos procesos fisicoquímicos, o bien, provienen de microorganismos (Seguel, 2020).

Los hidrocoloides de origen vegetal, como las gomas y los mucílagos son ampliamente utilizados en las industrias farmacéutica y cosmética debido a su seguridad, bajo costo, carácter biodegradable y fácil disponibilidad. Estos materiales naturales ofrecen

ventajas sobre los sintéticos al ser químicamente inertes, no tóxicos, económicos y estar fácilmente disponibles en el mercado (Prajapati *et al.*, 2013).

Dependiendo de las características de estas cadenas, su longitud, ramificaciones, la disposición de estas ramificaciones y su carga eléctrica, pueden ser solubles en frío o requerir un tratamiento térmico previo para disolverse y cumplir su función (Tech, 2022). Por ejemplo:

- Hidrocoloides solubles en frío: Requieren tratamiento térmico para desarrollar viscosidad o formar geles, como el alginato, goma guar, goma arábica, goma xantana y konjac.
- Hidrocoloides solubles en caliente: Necesitan tratamiento de térmico para aportar viscosidad o gelificar, y manifiestan su capacidad gelificante tras el enfriamiento de la solución, como el agar, carragenina, goma garrofin y diversas pectinas.

En la actualidad, los hidrocoloides desempeñan diversas funciones como agentes espesantes, gelificantes, modificadores de la cristalización del hielo y estabilizadores de emulsiones y espumas. Estas funciones en términos generales se denominan como "estabilizantes". Otros hidrocoloides se obtienen a través de la biotecnología, cultivando ciertas especies de microorganismos en grandes reactores que secretan mucílagos o gomas (Tech, 2022).

Los polisacáridos actúan como agentes estabilizadores debido a su afinidad por el agua, su estructura ramificada y su elevado peso molecular. Estas características favorecen el aumento de la viscosidad y la formación de redes que contribuyen a la estabilidad del sistema (Gharibzahedi *et al.*, 2013).

Las gomas y mucílagos son ingredientes vegetales ampliamente usados en la industria alimentaria por su versatilidad y propiedades funcionales únicas. De acuerdo con Mejía (2022), algunas de las razones importantes en la industria alimentaria incluyen:

1. Actúan como agentes emulsionantes, ayudando a estabilizar emulsiones de aceite y agua al formar películas alrededor de las gotas de aceite, retardando así su coalescencia.
2. Tienen la capacidad de espesar y gelificar soluciones acuosas, lo que es fundamental en la formulación de productos alimenticios como salsas, postres y productos lácteos.

3. Pueden retener agua y aceite, esto es importante para la textura y calidad de muchos alimentos.
4. Algunos mucílagos y gomas pueden tener efectos bioactivos benéficos para la salud, lo que los convierte en ingredientes atractivos para alimentos funcionales.

Nuestro grupo de trabajo ha reportado en Rodríguez-González *et al.* (2014), la composición química del mucílago de nopal de las mismas especies referidas en Martínez y Garnica (2021), mostrando la presencia de los azúcares *L*-arabinosa, *D*-xilosa, *D*-glucosa, *L*-ramnosa, así como de ácidos urónicos, los cuales conforman en proporciones variables la compleja estructura química de los mucílagos, de los cuales dependerán sus propiedades físico-químicas como son la capacidad de absorción de agua y de aceite, formación de geles viscosos y su capacidad de retención de azúcares como la glucosa y de lípidos como colesterol y triglicéridos, de interés para las personas con padecimientos metabólicos como la diabetes, dislipidemias y cardiovasculares.

Un estudio realizado por otro grupo de investigación (Herrera-Enciso *et al.*, 2021), evaluó el efecto del mucílago de *O. ficus-indica* sobre la viscosidad y aceptación sensorial de un yogurt bebible, explorando su potencial como aditivo natural para modificar las propiedades reológicas y sensoriales de este producto lácteo. Usando concentraciones de mucílago de nopal de 0.2 %, 0.8 %, 1.0 % y 1.5 %, concluyendo que la viscosidad del yogurt aumentó directamente con la concentración de mucílago. A partir de la concentración de 0.2 %, se observó este cambio. A una concentración de 1.5 %, el mucílago de nopal disminuyó la formación de ácido láctico en el yogurt, sin afectar el pH del mismo en ninguna concentración (Herrera-Enciso *et al.*, 2021).

Nuestro grupo de trabajo del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ha realizado dos investigaciones con tendencia a mejorar los rendimientos de extracción de mucílago. Rodríguez-González *et al.* (2014) tuvo rendimientos en cinco especies de nopal, mostrados en la Tabla 1. Zavala (2012) realizó la optimización del proceso de extracción de mucílago utilizando metodología de superficie de respuesta usando las mismas especies reportadas por Rodríguez-González *et al.* (2014), utilizandocomo variables independientes la relación de agua:cladodio, temperatura, tiempo de extracción y tiempo de

centrifugación. Logrando obtener rendimientos superiores a los reportados en la literatura. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por Zavala (2012).

Tabla 1. Rendimiento del mucílago de cinco especies del género *Opuntia*.

Especie de <i>Opuntia</i>	Rendimiento (%)	Mucílago (g)
<i>O. joconostle</i>	1.69	3.21
<i>O. atropes</i>	0.80	2.62
<i>O. hyptiacantha</i>	0.70	2.11
<i>O. tomentosa</i>	1.85	1.81
<i>O. streptacantha</i>	0.44	0.68

4.4 Modificaciones en polisacáridos

Cuando se hace referencia de modificación a los polisacáridos, es con relación a mejoras que se realizan en sus propiedades físicas y químicas. Esto se debe a que, en su estado original, estos compuestos presentan una baja estabilidad térmica y tienden a la retrogradación, lo cual limita su uso en aplicaciones cosmética, alimentaria y biomédicas. Es por ello que se han implementado modificaciones tanto físicas como químicas en su estructura, con el fin de ampliar sus posibles usos, aprovechando su bajo costo e inocuidad (Cortina, 2020).

4.4.1 Modificación física

En cuanto a las modificaciones físicas, es común encontrarlas en polisacáridos como el almidón, principalmente por su bajo costo de producción y la ausencia de productos químicos que puedan resultar tóxicos en aplicaciones alimentarias. Estas modificaciones implican la manipulación de factores como la temperatura, humedad, presión y fuerzas de corte, con el propósito de cambiar sus propiedades mecánicas como la gelatinización, hinchamiento y solubilidad (Ojogbo *et al.*, 2020).

Los polisacáridos modificados por métodos físicos se pueden dividir en dos categorías: aquellos con destrucción de la estructura granular y aquellos sin dicha destrucción (Ojogbo *et al.*, 2020). La mayoría de las modificaciones físicas implican la destrucción de la estructura granular en partículas más pequeñas para crear micro y nanoestructuras, mientras

que otros simplemente generan cavidades en la superficie para aumentar la interacción con el agua (Cortina, 2020).

4.4.2 Modificación química

Debido a la presencia abundante de grupos hidroxilo en los polisacáridos, se han explorado diversas modificaciones químicas, como eterificación, acilación, oxidación, sililación, e hidrólisis (Ojogbo *et al.*, 2020), entre otras. La acetilación es una modificación química por esterificación, es la más comúnmente empleada, sustituyendo grupos funcionales en los hidroxilos libres. Es importante destacar que todos los polisacáridos experimentan transformaciones químicas y bioquímicas incluso sin ser modificados en laboratorio (Cortina, 2020), es decir, pueden presentar cambios naturales por acción de enzimas, oxidación o condiciones de almacenamiento.

Las aplicaciones de los polisacáridos modificados varían según el grado de sustitución (GS), según lo indicado por Ojogbo *et al.* (2020). Aquellos con un bajo GS (0.1–0.2) se utilizan en películas, adhesivos, espesantes y estabilizadores; aquellos con alto GS encuentran su aplicación principal en biotecnológicas gracias a su naturaleza hidrófoba y solubilidad en disolventes específicos como acetona y cloroformo (Cortina, 2020).

4.5 Yogurt

El yogurt es el resultado de la leche coagulada a través de la fermentación láctica provocada por las bacterias *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. Para ser considerado yogurt, estos microorganismos deben estar vivos y presentes en una cantidad mínima de 1×10^7 colonias por gramo o mililitro del producto final (Norma Oficial Mexicana NMX-F-444-1983). Es un alimento característico de la dieta mediterránea y ha sido investigado por sus posibles beneficios para la salud, proporcionando minerales, vitaminas y proteínas de alta calidad (Babio *et al.*, 2017).

Incluir yogurt en la dieta está relacionado con un patrón alimentario saludable, y los consumidores de yogurt suelen tener un mejor perfil metabólico comparado con aquellos que no lo consumen (Cormier *et al.*, 2015; Panahi *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2013).

4.5.1 Composición nutricional del yogurt

El yogurt es una fuente de proteínas, posee un alto contenido de calcio, lo cual es positivo para la salud ósea, proporciona micronutrientes como fósforo, magnesio, zinc, yodo, potasio, y las vitaminas A, D, y del complejo B (principalmente B2, B3 y B12), ofrece cantidades significativas de probióticos, los cuales son beneficiosos para la salud digestiva, contiene menos lactosa, por lo que algunas personas con intolerancia a la lactosa no suelen experimentar síntomas al consumir este alimento (PREANU-Universidad de Costa Rica, 2023; Rangan *et al.*, 2012; Webb *et al.*, 2014).

4.5.2 Uso de hidrocoloides en el yogurt

Un estudio realizado por Bartolo-Rodríguez (2016), examinó cómo los hidrocoloides influyen en las características físicas, sensoriales y reológicas del yogurt. Se encontró que actúan como agentes espesantes, gelificantes, estabilizadores, inhibidores de la cristalización y emulsionantes. Los hidrocoloides modifican la textura del producto final, consistencia, apariencia y retención de agua del yogurt, reducen la sinéresis y permiten reducir costos al reemplazar proteínas y materia grasa en las formulaciones, manteniendo la textura del producto final.

5. JUSTIFICACIÓN

En tres estudios de nuestro grupo de trabajo se extrajo mucílago de *Opuntia ficus-indica*, siendo usado como aditivo en una crema de huitlacoche (Rodríguez, 2010), y se concluyó que el mucílago de nopal funciona como agente espesante, sustituyendo otros aditivos tradicionales como es el almidón modificado. También fue incorporado como material de pared para microencapsular el probiótico *Saccharomyces boulardii*, y su aplicación en queso, reportado por Zamora-Vega *et al.* (2012). En un estudio de Domínguez-Martínez *et al.* (2017) se formuló una película biodegradable conteniendo mucílago de nopal. En las formulaciones de las cápsulas y de la biopelícula se requirió agregar otros aditivos para mejorar propiedades de flexibilidad y resistencia, por lo que como espesante se necesita más investigación para tener un uso más diversificado para sus aplicaciones. Por ello, se requiere modificar químicamente el mucílago y mejorar o en su caso diversificar algunas de sus propiedades funcionales, y obtener soluciones con diferentes grados de viscosidad que generen productos con mejores propiedades tecnológicas y funcionales y pueda ser utilizado como un ingrediente en la formulación de las industrias de alimentos, bebidas, farmacéutica y cosmética.

6. HIPÓTESIS

La acetilación del mucílago de nopal modificará sus propiedades funcionales, para ser aplicado en la formulación de un alimento tipo yogurt bajo en grasa.

7. OBJETIVO GENERAL

Modificar por acetilación el mucílago de *Opuntia atropes* para mejorar algunas de sus propiedades funcionales y evaluar su aplicación como aditivo en una bebida tipo yogurt bajo en grasa.

8. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Extraer el mucílago de nopal y realizar su modificación química.
- Caracterizar químicamente y fisicoquímicamente las propiedades del mucílago nativo y modificado.

- Formular una bebida tipo yogurt bajo en grasa y caracterizar sus propiedades fisicoquímicas.

9. MATERIALES Y MÉTODOS

9.1 Extracción de mucílago de *Opuntia atropes*

Se colectó *Opuntia atropes* en el Campus Morelia de la Universidad Autónoma Chapingo (CRUCO). El mucílago fue extraído utilizando un método modificado por Rodríguez (2010) y Zavala (2012), con algunas variaciones con base a los estudios por Forni *et al.* (1994) y Medina-Torres *et al.* (2000).

Inicialmente, se retiraron las espinas de las pencas de nopal. Posteriormente, las pencas fueron lavadas con agua y jabón, cortadas en cuadros de aproximadamente 1 cm² y molidas en una licuadora con agua, empleando proporciones nopal:agua de 1:8, 1:6 y 1:4 (p/V). La mezcla obtenida se sometió a calentamiento a 83 ± 2 °C durante 2 h. Para la filtración, algunas muestras fueron centrifugadas a 3500 rpm durante 15 min, mientras que otras se filtraron utilizando un tamiz de acero inoxidable de malla 140.

El sobrenadante fue concentrado en una olla de acero inoxidable, sometiéndolo a calentamiento con agitaciones frecuentes hasta reducir su volumen a un tercio. En la siguiente etapa, el mucílago extraído, contenido en el sobrenadante, se precipitó mediante la adición de etanol al 96 % en proporciones alcohol:mucílago de 1:4, 1:3 y 1:3 (v/v), respectivamente. La mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente durante 24 h.

El mucílago aglomerado se recuperó por decantación y se secó a 40 °C durante 24 h en un horno de secado digital (ECOSHEL, modelo 9053). El mucílago seco fue molido en una licuadora hasta obtenerlo en forma de polvo. Estas extracciones se realizaron por triplicado.

9.2 Modificación química del mucílago de *Opuntia atropes* por acetilación

La modificación por acetilación del mucílago de *O. atropes* se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Huang *et al.* (2007) y Prieto-Méndez (2010), con algunas modificaciones. Se emplearon dos niveles de anhídrido acético, en una relación de 11.6 mL/g (anhídrido acético/mucílago) y otra de 5.8 mL/g (anhídrido acético/mucílago).

Inicialmente, el mucílago nativo fue dispersado en una solución de etanol al 75 % y agitado durante 10 min a temperatura ambiente. Posteriormente, el pH de la dispersión fue

ajustado a 8.0 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH). A continuación, el anhídrido acético se agregó gradualmente, gota a gota, a la mezcla, manteniendo el pH en un rango de 8.0 - 8.3 con NaOH. La reacción se mantuvo por 10 min. Posteriormente, la mezcla fue ajustada a pH de 4.5 con ácido clorhídrico. El mucílago acetilado fue recuperado mediante centrifugación (3500 rpm por 15 min) y lavado tres veces con etanol al 75 %. Para finalizar el proceso, el mucílago recuperado se llevó a secado a un horno digital (ECOSHEL, modelo 9053) por 24 h a 40 °C, el mucílago obtenido se molió y se tamizó en malla N° 120. Este procedimiento de modificación se replicó por triplicado.

9.2.1 Grupos acetilo y grado de sustitución

Los grupos acetilo y grado de sustitución del mucílago acetilado se determinaron siguiendo el método descrito por Vargas *et al.* (2016), con algunas modificaciones. Para ello, una muestra de 0.5 g de los mucílagos acetilados fueron pesadas y transferidas a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Posteriormente, se adicionaron 25 mL de agua destilada y 3 gotas de fenolftaleína como indicador. A continuación, se agregaron 12.5 mL de una solución de NaOH 0.45 N, y las mezclas fueron agitadas durante 30 min. Transcurrido este tiempo de reacción, las muestras fueron tituladas con una solución de HCl 0.2 N hasta la aparición de un color ligeramente rosado. Simultáneamente, se preparó y tituló un blanco utilizando mucílago nativo. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. El porcentaje de acetilación (% Acetil) representa el porcentaje en peso de grupos acetil en el mucílago en base seca y se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Acetil} = \frac{(mL \text{ blanco}) - (mL \text{ muestra}) \times N \text{ del HCl} \times 0.043}{\text{peso muestra b. s. (g)}}$$

El grado de sustitución es definido como el número promedio de sitios por unidad de azúcar que posee un grupo sustituyente y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 \times \% \text{ Acetil}}{4300 - (42 \times \% \text{ Acetil})}$$

9.3 Caracterización del mucílago nativo y acetilado

9.3.1 pH

Para preparar la solución se mezclaron en un vaso de precipitado 0.5 g de mucílagos nativo y acetilados en 5 mL de agua destilada, respectivamente. El pH de los mucílagos se determinó utilizando un potenciómetro digital (modelo YY-1030). La sonda del medidor de pH se introdujo en el vaso de precipitado que contenía el mucílago, manteniéndola en contacto con la muestra hasta obtener una lectura estable en la pantalla del dispositivo. La medición se realizó por triplicado para calcular el valor promedio del pH de los mucílagos.

9.3.2 Color

El color se determinó utilizando mucílagos nativos y acetilados en polvo mediante un espectrofotómetro BYK Gardner de color y brillo (modelo BK-EXP0010166). Estas lecturas se realizaron por triplicado. Este método incluye los valores de L^* (Luminosidad), a^* (tonos rojo-verde) y b^* (tonos amarillo-azul) del espacio de color CIELAB, así como los valores de C^* (croma) y h° (tono o matiz).

En el cual:

- L^* indica la luminosidad, donde $L^* = 0$ representa el color negro y $L^* = 100$, el color blanco.
- a^* indica los tonos rojos y verdes, donde un valor positivo corresponde a un tono rojo y un valor negativo, a un tono verde.
- b^* mide los tonos amarillos y azules, donde un valor negativo indica un tono azul y un valor positivo, un tono amarillo.
- C^* (croma) representa la saturación del color, donde 0 indica un color no saturado y 100, un color brillante.
- h° (tono o matiz) indica la ubicación del color en grados dentro de una rueda cromática, donde $h^\circ = 0^\circ$ corresponde al rojo, $h^\circ = 90^\circ$ al amarillo, $h^\circ = 180^\circ$ al verde y $h^\circ = 270^\circ$ al azul.

9.3.3 Actividad de agua (A_w)

La actividad de agua de los mucílagos nativo y acetilados en polvo se determinó por triplicado utilizando un medidor de actividad de agua LabSwift Novasina.

9.3.4 Capacidad de absorción de agua (WAC)

Para determinar la capacidad de absorción de agua se utilizó el método descrito por Bocarando-Guzmán *et al.* (2022). Para la preparación de la mezcla, se colocaron 0.3 g de mucílagos nativo y acetilados en polvo en tubos Falcon junto con 4.5 mL de agua destilada. Las mezclas se homogenizaron en un vortex por 10 min y, posteriormente, se agitaron en un agitador orbital (modelo CVP-2000P) durante 1 h. Después, se centrifugaron a 4000 rpm por 10 min. Los sobrenadantes se decantaron y se determinaron los pesos de los mucílagos con el agua absorbida.

La capacidad de absorción de agua se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$WAC (g \text{ agua}/g \text{ mucílago}) = \frac{A - B}{B}$$

Donde:

A= Peso (g) de mucílago seco y agua absorbida.

B= Peso (g) de mucílago seco.

Este procedimiento se realizó por triplicado.

9.3.5 Capacidad de absorción de aceite (OAC)

Para la preparación de la mezcla, se colocaron 0.3 g de mucílagos nativo y acetilados en polvo en tubos Falcon junto con 4.5 mL de aceite de canola. Las mezclas se homogenizaron en un vortex por 10 min y, posteriormente, se agitaron en un agitador orbital (modelo CVP-2000P) por 1 h y se centrifugaron a 4000 rpm por 10 min. Los sobrenadantes se decantaron y se determinaron los pesos de los mucílagos con el aceite absorbido.

La capacidad de absorción de aceite se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$OAC (g \text{ aceite}/g \text{ mucílago}) = \frac{A - B}{B}$$

Donde:

A= Peso (g) de mucílago seco y aceite absorbido.

B= Peso (g) de mucílago seco.

Esta prueba se realizó por triplicado.

9.3.6 Viscosidad

Se utilizó el método descrito por González-Sandoval *et al.* (2019) con algunas modificaciones. Para preparar las mezclas, se colocaron en un matraz Erlenmeyer los mucílagos nativos y acetilados en polvo y agua destilada en una proporción de 1:100 respectivamente, y se mantuvieron en agitación constante a 600 rpm durante 24 h a temperatura ambiente, utilizando una parrilla de calentamiento con agitador (modelo Guardian 7000). Posteriormente, se tomaron 10 mL de las soluciones y se colocaron en un viscosímetro (modelo Brookfield DV3T) utilizando la aguja ULA (0). Las velocidades de rotación se seleccionaron de manera que el porcentaje de torque no fuera inferior al 10 %. La viscosidad se midió variando la velocidad de rotación en orden ascendente (50, 75 y 100 rpm). Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y por triplicado.

9.3.7 Determinación del contenido de proteína

El porcentaje de proteína en los mucílagos nativo y acetilados fue determinado por triplicado por el método de Kjeldahl de acuerdo con la técnica 955.04/90 de la AOAC (2005), la cual comprende tres fases secuenciales: la digestión de la muestra con ácido sulfúrico (Serie DK 6 Heating Digester, VELP TM Scientifica), la destilación del producto digerido con vapor de agua (Serie UDK 129 Distillation Unit, VELP TM Scientifica) y, la valoración del destilado para el cálculo del contenido proteico. Para determinar el porcentaje de proteína de la muestra se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Nitrógeno (\%)} = \frac{N (HCl) \times V (HCl) \times 0.014}{\text{peso muestra}} \times 100$$

Donde:

N = Normalidad del HCl.

V = Volumen gastado de HCl.

0.014 = Factor (miliequivalentes de Nitrógeno).

$$\% \text{ Proteína} = (\% N)(6.25)$$

Donde:

% N= Porcentaje de Nitrógeno.

6.25= Factor (Nitrógeno promedio contenido en proteínas alimentarias).

9.3.8 Determinación del contenido de cenizas

La determinación de cenizas en las muestras se realizó con el método 942.05/90 de la AOAC (2005), el cual implicó el secado de las muestras en estufa a 115 °C por 1 h (modelo FE-293, Felisa), seguido de su incineración en mufla (modelo FE-363) a 550 °C por 3 h. Al final se obtuvo un residuo inorgánico de color gris uniforme. Esta determinación se hizo por triplicado. El porcentaje de cenizas se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{peso final} - \text{peso crisol}}{\text{peso muestra}} \times 100$$

9.3.9 Análisis del contenido de calcio en los mucílagos

El análisis de contenido de calcio se realizó en el Laboratorio de Espectroscopía de Absorción Atómica del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica con llama (FAAS, por sus siglas en inglés), utilizando un equipo Perkin Elmer AAnalyst 200. Las muestras evaluadas correspondieron al mucílago de *O. atropes* en su forma nativa y a los mucílagos modificados por acetilación al 1.78 % y 2.28 %.

La preparación de las muestras se realizó mediante una digestión húmeda a partir de cenizas obtenidas por incineración controlada. Los residuos resultantes se solubilizaron en un medio ácido para su análisis. Algunas muestras fueron diluidas para ajustar su concentración al rango lineal del equipo.

La determinación del calcio se llevó a cabo mediante una curva de calibración con soluciones patrón certificadas en un intervalo de 20.0 a 80.0 mg/g. Como parte del control

de calidad del análisis, se utilizó un estándar de referencia con una concentración conocida de 80.0 mg/g, obteniéndose un valor de 80.5 mg/g, lo que confirmó la precisión del procedimiento. Los resultados se reportaron como promedio $\pm$ desviación estándar, de acuerdo con la información proporcionada por el laboratorio.

9.3.10 Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para identificar la presencia de los diversos enlaces en las estructuras de los mucílagos nativos, acetilado al 2.28 % y acetilado al 1.78 %, los cuales fueron realizados en el Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Nanomateriales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se empleó un espectrómetro Bruker IR-FT Vertex 70 con accesorio ATR. El análisis se realizó en el rango de número de onda de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y un tiempo de barrido de 32 s.

9.4 Elaboración del yogurt

Se utilizó la metodología descrita por Tranquilino (2012) con algunas modificaciones. El cultivo iniciador activado se preparó a partir de un cultivo láctico liofilizado compuesto por *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Para su activación, el cultivo liofilizado se reconstituyó en leche baja en grasa (Santa Clara Light®), obteniéndose la suspensión madre utilizada en las inoculaciones posteriores. En el yogurt control se midieron 100 mL de leche baja en grasa, y se inocularon con 1 mL de la suspensión madre previamente preparada. Para la formulación de los yogures con mucílago, se pesaron 0.5 g de mucílago nativo o acetilado al 1.78 % y 0.5 g de grenetina (según el tratamiento). Los ingredientes se mezclaron con 100 mL de leche baja en grasa y se inocularon con 1 mL de la suspensión madre. Las mezclas inoculadas se incubaron a 43 °C por 8 h para permitir la fermentación y obtener el producto final.

9.5 Caracterización fisicoquímica del yogurt

Además de los yogures elaborados en la presente investigación, se compararon con yogures bebibles comerciales de la marca Yoplait®: Doble cero sabor fresa, Lala®: Sabor fresa-moras y Alpura®: Sabor fresa coco, de los cuales se describen a continuación sus características:

- Yogurt Yoplait® (Doble cero sabor fresa)

pH= 4.45 ± 0.006 , Sinéresis (%) = 74.98 ± 0.596 , Viscosidad (cP)= 336.0 ± 9.704 y Acidez (%) = 0.91

El cual contenía en sus ingredientes: leche descremada pasteurizada estandarizada; preparado de fruta 4.5 % (fresa 6 %); almidón modificado; saborizante artificial de fresa; ácido cítrico; sorbato de potasio; pectina; estevia (6.5 mg/100 g); colorantes (amarillo 6, rojo 6); sabor natural; enzimas; acesulfame K (14.4 mg/ 100 g); sucralosa (13.4 mg/ 100 g); cultivos lácticos y cultivos probióticos.

- Yogurt Lala® (Sabor fresa-moras)

pH = 4.20 ± 0.006 , Sinéresis (%) = 69.96 ± 0.429 , Viscosidad (cP) = 296.1 ± 2.443 y Acidez (%) = 0.55

El cual contenía en sus ingredientes: leche semidescremada pasteurizada de vaca; azúcares añadidos (sacarosa); leche descremada en polvo; preparado de fruta 10 % (azúcares añadidos: sacarosa, jugo concentrado de uva); fresa; zarzamora; frambuesa; saborizante natural; ácido cítrico; citrato de sodio (regulador de acidez); sorbato de potasio (conservador); rojo 40 y azul 1 (colorantes); almidón modificado; grenetina; fibra cítrica; pectina (estabilizantes); cultivos lácticos y natamicina (conservador).

- Yogurt Alpura® (Sabor fresa coco)

pH = 4.40 ± 0.035 , Sinéresis (%) = 55.04 ± 0.323 , Viscosidad (cP) = 123.3 ± 0.751 y Acidez (%) = 0.79

El cual contenía en sus ingredientes: leche parcialmente descremada pasteurizada; 19 % de preparado de fruta (azúcares añadidos [azúcar], fresa [15.7 %], coco [2.1 %], pectina, lactato de calcio, saborizante artificial y saborizante idéntico al natural, sorbato de potasio y color rojo natural 4); lactasa; cultivos lácticos y natamicina.

9.5.1 pH del yogurt

Para medir el pH del yogurt, se colocaron 10 mL del yogurt control, 10 mL del yogurt con mucílago nativo, 10 mL del yogurt con mucílago nativo y grenetina, 10 mL del yogurt con mucílago acetilado al 1.78 % y 10 mL del yogurt con mucílago acetilado al 1.78 % y

grenetina, todo esto en vasos de precipitados respectivamente, a 8 °C como lo indica la metodología de Reyes y Ludeña (2015). El pH de cada yogurt se evaluó con un potenciómetro digital de mesa (modelo AquaSearcher™ AB23PH). Cada medición se repitió tres veces.

9.5.2 Color del yogurt

El color se determinó a los distintos tratamientos de los yogures mediante un espectrofotómetro BYK Gardner de color y brillo (modelo BK-EXP0010166). Estas lecturas se realizaron por triplicado. Los parámetros medidos se describieron en la sección 9.3.2.

9.5.3 Actividad de agua del yogurt

La actividad de agua de los diferentes tratamientos del yogurt se determinó utilizando un medidor de actividad de agua LabSwift Novasina. Las mediciones se realizaron por triplicado.

9.5.4 Viscosidad del yogurt

Se siguió el procedimiento descrito por González-Sandoval *et al.* (2019) con algunas adecuaciones. Se colocaron 10 mL de los diferentes tratamientos de los yogures (yogurt control, yogurt con mucílago nativo, yogurt con mucílago nativo y grenetina, yogurt con mucílago acetilado al 1.78 % y yogurt con mucílago acetilado al 1.78 % y grenetina) a 8 °C. Cada muestra se introdujo en el viscosímetro (modelo Brookfield DV3T) usando la aguja ULA (0) a 10 rpm. Las mediciones se realizaron por triplicado.

9.5.5 Grado de sinéresis

El grado de sinéresis se determinó siguiendo la metodología descrita por Reyes y Ludeña (2015), con modificaciones. Se pesaron 20 g de muestra en tubos Falcon y se centrifugaron por 15 min a 3500 rpm a temperatura ambiente. Cada determinación se realizó por triplicado.

El porcentaje de sinéresis se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sinéresis} = \frac{\text{Peso del sobrenadante (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100$$

9.5.6 Determinación de acidez del yogurt

Se realizó la titulación por triplicado y de acuerdo a la técnica de la NOM-185-SSA1-2002.

Se determinó el porcentaje de acidez conforme a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Acidez (Ácido láctico)} = \frac{V * N * 90}{M} \times 100$$

Donde:

V= Volumen de la solución de NaOH gastado en litros (L).

N= Normalidad de la solución de NaOH [0.1 N] (eq-g/L).

M= Volumen de la muestra en mililitros (mL).

90= Equivalente de ácido láctico (g/eq-g).

10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Todas las determinaciones experimentales se realizaron por triplicado (n = 3), y los resultados se expresaron como la media $\pm$ la desviación estándar.

Para evaluar la existencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (mucílago nativo, mucílago acetilado 1.78 % y mucílago acetilado 2.28 %), se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA). En los casos en que el ANOVA reveló diferencias significativas ($p < 0.05$), se llevó a cabo una prueba post-hoc de Tukey (HSD) para identificar cuáles grupos específicos presentaban diferencias estadísticamente significativas. Un valor de $p < 0.05$ fue considerado como estadísticamente significativo.

Todos los análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el software RStudio v4.3.2 (R Core Team, 2023), a través de la interfaz RStudio v2023.12.0 (Build 369), desarrollada por Posit Software, PBC. No se emplearon paquetes adicionales, únicamente funciones del entorno base de R.

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1 Extracción de Mucílago de *Opuntia atropes*

Se realizaron extracciones de mucílago a partir de 1 kg de *Opuntia atropes* en cada experimento. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Rendimiento promedio en la extracción del mucílago de *Opuntia atropes*.

Proporción	Rendimiento (%)
8:1 agua:nopal; 4:1 alcohol:mucílago	0.997 ^a ± 1.69
6:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago	0.790 ^a ± 2.03
4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago	0.940 ^a ± 1.37

Letras diferentes en la misma columna significa existencia de diferencia significativa ($p < 0.05$).

Después de realizar el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey, se observó que no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos. Sin embargo, se observa en la Tabla 2 que los tratamientos con las proporciones 4:1 (agua:nopal) + 3:1 (alcohol:mucílago) y 8:1 (agua:nopal) + 4:1 (alcohol:mucílago) presentaron resultados aún más similares entre sí.

Por otro lado, de acuerdo con Zavala (2012), quien optimizó la extracción en cinco especies de *Opuntia*, incluida *O. atropes*, reportó un rendimiento del 0.80 %, por lo que dicho valor fue comparable con los rendimientos presentados en la Tabla 2 de esta investigación, ya que en ambos estudios se emplearon proporciones similares de agua:nopal y alcohol:mucílago. Los rendimientos están directamente relacionados con la cantidad de agua y alcohol utilizados durante el proceso de extracción; es decir, una mayor cantidad de agua favorece el aumento del rendimiento, al facilitar la extracción de otros compuestos asociados al mucílago (Zavala, 2012).

El papel del etanol en el proceso es crucial, al ayudar a precipitar el mucílago. Una proporción insuficiente de etanol puede resultar en una precipitación incompleta, afectando negativamente el rendimiento. Además, otros factores como la temperatura, especie y edad

del cladodio, y las condiciones de crecimiento del nopal también influyen significativamente en los rendimientos obtenidos (Medina-Torres *et al.*, 2000; Ornelas, 2011).

En este contexto, a pesar de que los tratamientos analizados no evidenciaron diferencias significativas en su rendimiento, la proporción de 4:1 (agua:nopal) combinada con 3:1 (alcohol:mucílago) se presenta como la alternativa más favorable. Esto se debe a que proporciona valores similares a los de los otros tratamientos, pero con un menor uso de recursos y una mayor eficiencia en términos de tiempo y costos, lo que la convierte como la opción más adecuada para futuras implementaciones.

11.2 Modificación química del mucílago de *Opuntia atropes* por acetilación, grupos acetilo y grado de sustitución

La modificación por acetilación del mucílago nativo se llevó a cabo en dos condiciones experimentales distintas, las cuales se diferenciaron por la masa inicial de mucílago nativo empleada (2 g y 4 g, respectivamente). Los resultados obtenidos de este proceso, incluyendo los rendimientos de la reacción, el porcentaje de acetilación y el grado de sustitución de cada mucílago modificado, se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Rendimientos, porcentaje de acetilación y grado de sustitución de los mucílagos acetilados de *Opuntia atropes*.

Mucílago modificado	Rendimiento (g)	Rendimiento (%)	Acetilación (%)	Grado de Sustitución (GS)
De 2g	1.399 ^b ± 0.170	69.980 ^b ± 8.530	2.280 ^a ± 0.075	0.088 ^a ± 0.003
De 4g	3.299 ^a ± 0.026	82.480 ^a ± 0.670	1.780 ^b ± 0.135	0.068 ^b ± 0.005

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados de este estudio mostraron que la condición que presentó la menor masa inicial de mucílago (2 g) presentó un porcentaje de acetilación superior (2.28 %) y un grado de sustitución más elevado (0.088), en contraste con el tratamiento que contenía 4 g de mucílago, alcanzó un 1.78 % de acetilación y un grado de sustitución de 0.068.

Esta diferencia se atribuye a la relación reactivo–sustrato utilizado en cada caso. Aunque en ambos tratamientos se emplearon el mismo volumen de anhídrido acético siguiendo la metodología de Huang *et al.* (2007) y Prieto-Méndez (2010), la relación fue de 11.6 mL/g para 2 g de mucílago y de 5.8 mL/g para 4 g. Al incrementarse la masa de mucílago sin modificar la cantidad de reactivo, disminuyó proporcionalmente la cantidad de anhídrido acético disponible por gramo de muestra, lo que explica la menor acetilación y el menor grado de sustitución observados.

Una relación más elevada de reactivo por masa favorece una mayor disponibilidad de anhídrido acético para reaccionar con los grupos hidroxilo del mucílago, lo que, en teoría, puede dar lugar a un mayor grado de sustitución. Diversos autores han observado mejoras en la eficiencia de la acetilación al incrementar la relación líquido-sólido en polisacáridos (Hu *et al.*, 2022; Poon *et al.*, 2023). Por lo tanto, es factible que si se hubiera empleado 4 g de mucílago con una relación de 11.6 mL/g (es decir, ajustando proporcionalmente el volumen de reactivo) se habría favorecido un incremento en el porcentaje de acetilación y en el grado de sustitución. No obstante, dicha estrategia implicaría un riesgo de superar los límites comúnmente aceptados para modificaciones químicas seguras en ingredientes alimentarios, por ejemplo, hasta 2.5 % de grupos acetilo en almidones modificados y un grado de sustitución de 0.1 (EFSA ANS Panel, 2017; Food And Drug Administration, HHS, s. f.; Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives FAO - Joint Secretariat, 2015), por lo que una relación mayor no necesariamente es la más adecuada desde el punto de vista regulatorio.

Actualmente no existen normas mexicanas ni del Codex que establezcan límites específicos para mucílagos vegetales como el de nopal; sin embargo, estas referencias pueden tomarse como parámetros comparativos para asegurar que el nivel de modificación química permanezca dentro de rangos seguros y aceptados para uso alimentario.

11.3 Caracterización de los mucílagos nativo y acetilados al 1.78 % y 2.28 %

11.3.1 pH

En la Tabla 4 se presenta el promedio de los valores de pH obtenidos del mucílago nativo y acetilados de *O. atropes* disuelto en agua destilada.

Tabla 4. Valores de pH de los mucílagos nativo y acetilados de *Opuntia atropes* obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	pH
Nativo	6.60 ^a ± 0.01
Acetilado al 1.78 %	4.97 ^b ± 0.01
Acetilado al 2.28 %	4.97 ^b ± 0.01

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se calcularon las medias del pH a partir de los triplicados realizados, obteniéndose para el mucílago nativo un valor promedio de 6.60, lo cual indica un pH ligeramente ácido. Este resultado se encuentra dentro del rango reportado en estudios previos, como el de Vargas-Rodríguez *et al.* (2016), lo que sugiere una similitud en la composición del mucílago aun cuando provenga de distintas fuentes.

En cambio, los mucílagos acetilados (con porcentaje de acetilación de 1.78 % y 2.28 %) presentaron un pH promedio significativamente inferior, alcanzando un valor de 4.97 ± 0.01 (ver Tabla 4) en ambos casos. Esta reducción en el pH se relaciona con la técnica de acetilación empleada, la cual incorpora grupos acetilo en la estructura del polisacárido, así como la posible presencia de ácido acético residual, y el pH final en que se estabiliza el mucílago.

Un pH ligeramente ácido podría influir en las propiedades funcionales del mucílago, incluyendo su capacidad para gelificar, viscosidad, interacciones con otros componentes, etc. (Rodríguez-González *et al.*, 2014).

11.3.2 Color

En la Tabla 5 se presentan los promedios de los valores obtenidos según el modelo CIELAB para los mucílagos nativo y modificados en polvo de *O. atropes*.

Tabla 5. Valores del modelo CIELAB para los mucílago nativo y modificados de *Opuntia atropes* obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Nativo	$63.09^a \pm 1.34$	$-1.50^a \pm 0.02$	$8.97^c \pm 0.15$	$9.33^c \pm 0.29$	$98.34^a \pm 0.84$
Acetilado al 1.78 %	$50.06^b \pm 2.30$	$-1.45^b \pm 0.06$	$13.81^a \pm 0.82$	$14.06^a \pm 0.63$	$95.74^b \pm 0.27$
Acetilado al 2.28 %	$48.44^c \pm 1.86$	$-1.25^c \pm 0.15$	$11.35^b \pm 0.48$	$11.94^b \pm 1.35$	$95.25^c \pm 0.77$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

El modelo CIELAB, ilustrado en la Figura 1, muestra y describe la distribución de los colores en función de los valores de cada uno de sus parámetros (L^* , a^* , b^* , C^* y h°).

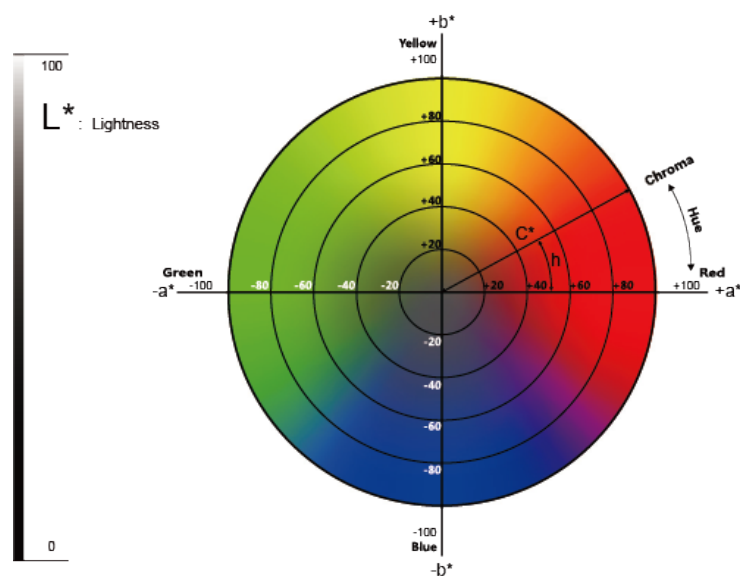


Figura 1. Modelo CIELAB para evaluar los parámetros de color L^* , a^* , b^* , C^* y h° . Fuente: CHNSpec, *Why use CIE-Lab color metrics.* Fuente: <https://www.chnspec.net/es/Spanish/Why-Use-CIE-Lab-Color-Metrics.html>

Tomando en cuenta el promedio de los valores de cada parámetro, se obtuvieron los siguientes resultados:

- L^* = La acetilación provocó una disminución en la luminosidad de los mucílagos, resultando una apariencia más oscura. A medida que aumentó el grado de acetilación (2.28 % frente a 1.78 %), la luminosidad tendió a disminuir aún más, aunque las diferencias entre los dos acetilados fueron menos marcadas en comparación con las observadas entre el mucílago nativo y los acetilados.
- a^* = Todos los mucílagos presentaron una ligera tonalidad verdosa.
- b^* = Todos los mucílagos mostraron una tonalidad amarillenta, con un incremento en este parámetro después de la acetilación.
- C^* = Los mucílagos acetilados presentaron una mayor saturación de color en comparación con el mucílago nativo.
- h° = La tonalidad principal se mantuvo dentro de la región amarillo-verde; sin embargo, con la acetilación, el ángulo se aproximó más a los 90° (amarillo puro), lo cual coincide con el parámetro de b^* .

Estos resultados coinciden con los reportados por Luna-Sosa (2019), Orozco (2017) y Díez *et al.* (2020) en estudios similares, lo que sugiere que las variaciones observadas pueden estar relacionadas con cambios en la composición química y la estructura del mucílago.

Después del proceso de acetilación, se observó una disminución en los valores de L^* , a^* y h° , lo cual puede influir en un cambio ligero de color.

Estos cambios pueden relacionarse con la incorporación de grupos acetilo, los cuales alteran la estructura de la red del polisacárido y modifican la forma en que la luz interactúa con el material, pudiendo influir en la estabilidad y distribución de los pigmentos naturales. De acuerdo con Agate *et al.* (2023), las modificaciones químicas afectan la apariencia visual de los polímeros al alterar su conformación y microestructura, lo que se refleja directamente en sus propiedades cromáticas.

La información obtenida sobre el color puede ser valiosa para diversas aplicaciones, tales como el control de calidad en procesos de producción, la identificación de distintas variedades o tipos de materiales, así como en el desarrollo de nuevos productos con

características cromáticas específicas. Además, estos resultados pueden servir como referencia para futuras investigaciones en este ámbito.

11.3.3 Actividad de agua (Aw)

Se determinó la cantidad de agua disponible en los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes*. Los promedios de los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Actividad de agua de los mucílagos nativo y modificados en polvo de *Opuntia atropes*, obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	Aw
Nativo	0.413 ^a $\pm$ 0.001
Acetilado al 1.78 %	0.279 ^c $\pm$ 0.004
Acetilado al 2.28 %	0.309 ^b $\pm$ 0.001

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

El mucílago nativo presentó un valor de actividad de agua (Aw) de 0.413 ± 0.001 . Después de la acetilación, los mucílagos presentaron valores significativamente menores, observándose diferencias tanto respecto al mucílago nativo como entre los acetilados. El mucílago con un porcentaje de acetilación del 1.78 % (GS $\approx$ 0.068) presentó la menor Aw (0.279 ± 0.004), y el mucílago con 2.28 % de acetilación (GS $\approx$ 0.088) mostró un valor ligeramente superior (0.309 ± 0.001), aunque ambos fueron significativamente inferiores al nativo. La disminución en la Aw de los mucílagos acetilados indica una alteración en su capacidad para retener agua. La incorporación de grupos acetilo en la estructura del mucílago pudo reducir la cantidad de sitios hidroxilo disponibles para establecer interacciones con las moléculas de agua (Hu *et al.*, 2022).

En general, esto indica una cantidad reducida de agua disponible para el crecimiento microbiano y las reacciones químicas. Los bajos valores de Aw sugieren que el mucílago nativo y modificados reflejan una buena estabilidad y una prolongada vida útil, dado que la disponibilidad de agua para procesos de deterioro es baja. Estos resultados coinciden con lo

reportado por Farías-Cervantes *et al.* (2016) en su análisis del mucílago nativo, lo que respalda aún más la estabilidad del mucílago de nopal. Esta característica lo vuelve un ingrediente interesante para la industria alimentaria, ya que puede contribuir a prolongar la vida útil de los productos y a disminuir la necesidad de aditivos como conservadores.

11.3.4 Capacidad de absorción de agua (WAC)

Para evaluar la capacidad de absorción de agua de los mucílagos nativo y modificados de *O. atropes*, se determinaron los pesos correspondientes y se calculó el resultado final utilizando la fórmula establecida. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Capacidad de absorción de agua del mucílago nativo y modificados de *Opuntia atropes* obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	WAC (g agua/g mucílago)
Nativo	$7.10^b \pm 0.18$
Acetilado al 1.78 %	$10.26^a \pm 0.21$
Acetilado al 2.28 %	$10.34^a \pm 0.34$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

El mucílago nativo mostró un valor de WAC de 7.10 ± 0.18 , esto indica que 0.3 g de mucílago nativo de *O. atropes* pueden absorber 7.10 veces su peso. Por otro lado, se identificaron diferencias significativas en la WAC de los mucílagos acetilados en comparación con el nativo. Los mucílagos con un porcentaje de acetilación del 1.78 % (GS ≈ 0.068) tuvieron 10.26 ± 0.21 de WAC y los mucílagos con un porcentaje de acetilación del 2.28 % (GS ≈ 0.088) obtuvieron 10.34 ± 0.34 de WAC, sin diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellos; sin embargo, ambos presentaron una WAC considerablemente superior a la del mucílago nativo. Estos resultados indican que la modificación química genera cambios estructurales en el mucílago que favorecen su interacción con el agua. Este comportamiento coincide con lo reportado por Bolade & Oni (2016), quienes observaron un aumento en la

WAC de almidones derivados del camote y ñame después del proceso de acetilación. En su investigación, la incorporación de grupos acetilo generó una red polisacárida más abierta y flexible, capaz de atrapar y retener un mayor volumen de moléculas de agua. En donde, la incorporación de grupos acetilo, a pesar de su carácter hidrofóbico, puede provocar un debilitamiento de las interacciones intermoleculares (por ejemplo, puentes de hidrógeno). Estos datos se alinean con lo reportado por Zhang & Huang (2024), quienes observaron un comportamiento similar en polisacáridos acetilados extraídos de la piel del frijol mungo. Al comparar estos hallazgos con los reportados por Mejía (2022), quien analizó las propiedades funcionales y fisicoquímicas del mucílago nativo de nopal y reportó una capacidad de absorción de agua de 2.46 ± 0.07 g de agua/g de polvo de mucílago para *O. ficus-indica*, se observa una diferencia significativa respecto a lo obtenido en este estudio. Esta variación se puede atribuir principalmente a la especie de nopal, y a factores como condiciones de cultivo o métodos de extracción y secado empleados. Los resultados en general muestran una capacidad de absorción de agua muy alta en el mucílago nativo y acetilados de *O. atropes*. Esta característica sugiere un gran potencial para su uso en la industria alimentaria como espesante, estabilizante y formador de geles.

11.3.5 Capacidad de absorción de aceite (OAC)

Para determinar la capacidad de absorber aceite (OAC) de los mucílagos nativo y modificados de *O. atropes*, se llevaron a cabo las mediciones necesarias de los pesos correspondientes. Posteriormente, se calculó el resultado final empleando la fórmula correspondiente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Capacidad de absorción de aceite (OAC) del mucílago nativo y modificados de *Opuntia atropes*.

Mucílago	OAC (g aceite/g mucílago)
Nativo	$2.51^a \pm 0.29$
Acetilado al 1.78 %	$2.24^a \pm 0.11$
Acetilado al 2.28 %	$2.05^a \pm 0.07$

Letras diferentes en la misma columna significa que existen diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados indicaron una pequeña disminución en la OAC, aunque sin observarse diferencias significativas entre el mucílago nativo (2.51 ± 0.29) y los mucílagos modificados mediante acetilación, que presentaron valores de 2.24 ± 0.11 para un porcentaje de acetilación del 1.78 % ($GS \approx 0.068$) y de 2.05 ± 0.07 para un porcentaje de acetilación del 2.28 % ($GS \approx 0.088$).

Estos resultados sugieren que el proceso de acetilación, bajo las condiciones evaluadas, no modificó de manera significativa la capacidad de los mucílagos para interactuar y retener aceite. A pesar de la incorporación de grupos acetilo, que otorgan un carácter más hidrofóbico a la molécula, la falta de diferencias significativas podría explicarse por ejemplo a que es posible que el grado de sustitución logrado no haya sido suficiente para provocar alteraciones estructurales que impacten la capacidad de retención de aceite de manera estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

Estudios previos reportan comportamientos similares. Bolade & Oni (2016) observaron una disminución significativa de la OAC en almidones de camote y ñame acetilados, debido a una menor capacidad de unión al aceite, relacionada con una reorganización estructural de la matriz del almidón bajo condiciones de bajo grado de sustitución (GS). Por otro lado, el almidón del frijol guandú acetilado con un grado de sustitución similar, presentó un ligero aumento en la OAC, lo que sugiere que niveles bajos de sustitución pueden tener un efecto limitado sobre esta propiedad.

Al comparar estos resultados con los reportados por Mejía (2022), quien informó una OAC de 1.75 ± 0.05 g de aceite/g de polvo de mucílago nativo de *O. ficus-indica*, se observa que este valor es más bajo que el obtenido en esta investigación. Esta diferencia sugiere que la capacidad de absorción de aceite puede variar dependiendo de la especie de nopal, las condiciones de cultivo y el método de extracción empleado.

Estos resultados indican que el mucílago nativo y acetilado de *O. atropes* presenta una capacidad moderada para absorber aceite. Esta propiedad sugiere un potencial para su aplicación en la industria alimentaria como emulsionante y estabilizante.

11.3.6 Viscosidad

Se evaluó la viscosidad de los mucílagos nativo y modificados de *O. atropes* a 100 rpm y los resultados se presentan en la Tabla 9. Se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre todos los grupos de mucílago analizados. El mucílago nativo presentó un valor de viscosidad de 13.1 ± 0.38 cP. La acetilación al 1.78 % condujo a una disminución significativa ($p < 0.05$) de la viscosidad (9.81 ± 1.21 cP) en comparación con el mucílago nativo. Esta reducción puede atribuirse a la incorporación de grupos acetilo, que, al ser menos polares que los grupos hidroxilo, disminuyen las interacciones intermoleculares, especialmente la formación de puentes de hidrógeno entre las cadenas del mucílago, generando una red más dispersa y menos cohesiva.

Tabla 9. Evaluación de la viscosidad de los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes* a 100 rpm.

Mucílago	Viscosidad (cP)
Nativo	$13.10^b \pm 0.38$
Acetilado al 1.78 %	$9.81^c \pm 1.21$
Acetilado al 2.28 %	$17.77^a \pm 0.55$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Por otro lado, el mucílago con un porcentaje de acetilación del 2.28 % ($GS \approx 0.088$) presentó un incremento significativo ($p < 0.05$) en la viscosidad (17.77 ± 0.55 cP), superando al mucílago nativo. Esto puede deberse a un cambio en el tipo de interacciones que predominan dentro de la red polisacárida; es decir, a niveles más altos de sustitución, los grupos acetilo incorporados favorecen interacciones hidrofóbicas, lo que contribuye a la formación de una red más densa y organizada. Este cambio de interacciones polares (puentes de hidrógeno) hacia interacciones hidrofóbicas refleja un comportamiento dual, donde la estructura del mucílago se reorganiza conforme al grado de sustitución y puede generar una matriz más resistente al flujo.

Este patrón de disminución de viscosidad a bajos grados de sustitución y aumento a grados de sustitución más elevados, coincide con lo reportado por Konował *et al.* (2024), quienes plantean que la acetilación en almidones modificados influye en la viscosidad en función del grado de sustitución. A bajos grados de sustitución la viscosidad se reduce al disminuir la cohesión interna, mientras en niveles moderados o altos, puede existir un incremento como resultado de la reestructuración de la matriz polisacárida y el fortalecimiento de las interacciones intermoleculares reorganizadas.

La viscosidad del mucílago fue superior al reportado por Ornelas (2011), quien evaluó la viscosidad del mucílago de *O. ficus-indica* a diferentes concentraciones y rpm. En su investigación reportó viscosidades entre 3.26 y 3.67 cP a 50 rpm, lo que sugiere que la variedad de nopal, las condiciones de extracción o la concentración del mucílago pueden influir en la viscosidad. Estas características reológicas hacen que el mucílago de nopal sea ideal para su uso en la industria alimentaria como espesante, estabilizante o formador de geles.

11.3.7 Determinación del contenido de proteína

El contenido de proteína de los mucílagos nativo y modificados por acetilación se presenta en la Tabla 10. Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el porcentaje de proteína entre todas las muestras evaluadas.

Tabla 10. Porcentaje de proteína de los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes*.

Mucílago	Proteína (%)
Nativo	9.231 ^b $\pm$ 0.003
Acetilado al 1.78 %	11.525 ^a $\pm$ 0.22
Acetilado al 2.28 %	7.477 ^c $\pm$ 0.21

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

El contenido proteico del mucílago nativo de *O. atropes* fue de $9.23 \% \pm 0.003$, valor significativamente superior al rango reportado por Vargas-Solano *et al.* (2022), quienes observan que el contenido proteico en el mucílago de *O. ficus-indica* oscila entre 2.5 % y 5.7 %. Esta diferencia podría estar relacionada a factores como la especie, las condiciones de cultivo, la edad del cladodio o el método de extracción utilizado.

Después del proceso de acetilación, se observó una variación significativa en el contenido proteico, este aumentó a $11.52 \% \pm 0.22$ ($GS \approx 0.068$) y posteriormente disminuyó a $7.47 \% \pm 0.21$ ($GS \approx 0.088$). El incremento inicial puede explicarse por una mayor retención de proteínas asociadas, como consecuencia del aumento en la masa molecular y las modificaciones en la red polisacárida. Por otro lado, la disminución observada en la segunda acetilación podría ser consecuencia de una disolución parcial o un lavado de proteínas unidas a estructuras poliméricas más compactas.

Dado que no se han encontrado investigaciones previas que analicen el contenido proteico después de la acetilación en el mucílago de nopal, este estudio aporta información innovadora. Estos resultados pueden ser un punto de partida para futuras investigaciones para complementar el análisis proteico en el mucílago acetilado y determinar si las variaciones observadas son resultado de modificaciones en la unión o pérdida visible de proteínas.

11.3.8 Determinación del contenido de cenizas

El porcentaje de cenizas de los mucílagos de *O. atropes* nativo y acetilados se determinó siguiendo la metodología estándar y los resultados se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. Porcentaje de cenizas de los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes*.

Mucílago	Cenizas (%)
Nativo	$9.35^b \pm 0.07$
Acetilado al 1.78 %	$12.96^a \pm 0.1$
Acetilado al 2.28 %	$11.51^a \pm 1.28$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se observaron diferencias significativas entre el mucílago nativo y los mucílagos modificados por acetilación. La acetilación del mucílago de *O. atropes* incrementó significativamente en el contenido de cenizas, que pasó de $9.35 \% \pm 0.07$ en su estado nativo a $12.96 \pm 0.10 \%$ (GS ≈ 0.068) y $11.51 \% \pm 1.28$ (GS ≈ 0.088) en los mucílagos modificados.

Investigaciones realizadas por Rosida *et al.* (2019) en polisacáridos, como el almidón, han reportado resultados similares, observándose un aumento en el contenido de cenizas después del proceso de acetilación, lo cual podría estar relacionado con una mayor retención de compuestos minerales relacionados con el proceso de modificación química.

El incremento observado en el contenido de cenizas también puede atribuirse a la presencia de sales residuales que se forman en un medio alcalino (NaOH), las cuales pueden permanecer en el material incluso después de los lavados. La ausencia de diferencias significativas entre los dos niveles de acetilación sugiere que no fue el grado de sustitución el factor determinante.

11.3.9 Análisis del contenido de calcio en los mucílagos

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para la concentración de calcio (mg/g) en el mucílago nativo y en los mucílagos modificados por acetilación, determinados mediante espectrometría de absorción atómica de flama. A partir de estos valores, se realizó la interpretación correspondiente, considerando los posibles efectos del proceso de modificación química sobre la retención de este mineral.

Tabla 12. Concentración de calcio en los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes* determinados por espectrometría de absorción atómica con llama.

Mucílago	Concentración de calcio (mg/g)
Nativo	87.531 ± 0.963
Acetilado al 1.78 %	161.812 ± 3.517
Acetilado al 2.28 %	92.011 ± 2.034

El análisis de calcio mostró que el mucílago acetilado al 1.78 % con un Grado de Sustitución (GS) de 0.068, presentó la mayor concentración (161.812 ± 3.517 mg/g), seguido

por el mucílago acetilado al 2.28 % ($GS \approx 0.088$) (92.011 ± 2.034 mg/g) y el mucílago nativo (87.531 ± 0.963 mg/g). Estos resultados indican que la acetilación influyó en la capacidad del mucílago para retener calcio; sin embargo, este efecto no mostró una relación directamente proporcional con el grado de sustitución.

La información disponible sobre la composición mineral del mucílago aislado de *Opuntia spp.* sigue siendo limitada, ya que la mayoría de los estudios reportan el calcio presente en el cladodio completo o en sus derivados (Ayadi *et al.*, 2009; Sáenz *et al.*, 2004), sin enfocarse específicamente en el mucílago ni en sus formas modificadas. En este contexto, los datos obtenidos en este trabajo representan una aportación original al conocimiento fisicoquímico del mucílago de *O. atropes*.

El mayor contenido de calcio observado en el mucílago acetilado al 1.78 % puede estar relacionado con una estructura polisacárida que favorece la interacción con cationes divalentes. Se ha reportado que el calcio puede formar puentes iónicos con grupos funcionales de polisacáridos, estabilizando su red tridimensional (Thakur *et al.*, 1997). En matrices como almidones modificados, este fenómeno no solo depende del grado de sustitución, sino sobre todo de su organización estructural de la red del polisacárido, más que de una relación lineal con el porcentaje de grupos acetilo incorporados (Kaur *et al.*, 2012; Lawal & Adebawale, 2005).

Este comportamiento se relaciona con otras propiedades previamente discutidas, como el contenido de cenizas y la capacidad de absorción de agua, que también alcanzaron sus valores más altos en el mucílago acetilado al 1.78 %. El calcio podría contribuir a la retención de agua mediante enlaces iónicos con la red polimérica, sin provocar un aumento en la viscosidad, lo cual coincide con lo observado en esta muestra (Zhang *et al.*, 2019).

Por lo tanto, estos resultados evidencian que la acetilación no solo modifica propiedades fisicoquímicas convencionales del mucílago, sino que también influye en su interacción con minerales como el calcio. La falta de estudios específicos en este tema resalta la relevancia científica de este análisis y permite considerar estos datos como un punto de partida para investigaciones futuras en modificación de polisacáridos y su funcionalidad en matrices alimentarias.

11.3.10 Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis por FTIR permitió identificar los principales grupos funcionales presentes en el mucílago nativo (MN) y en los mucílagos modificados químicamente por acetilación al 1.78 % (MA 1.78%) y al 2.28 % (MA 2.28%). En la Figura 2 se presentan los espectros FTIR correspondientes a las muestras, en los cuales se detectaron bandas características de compuestos de polisacáridos, con variaciones que se atribuyen a la modificación estructural provocada por la acetilación.

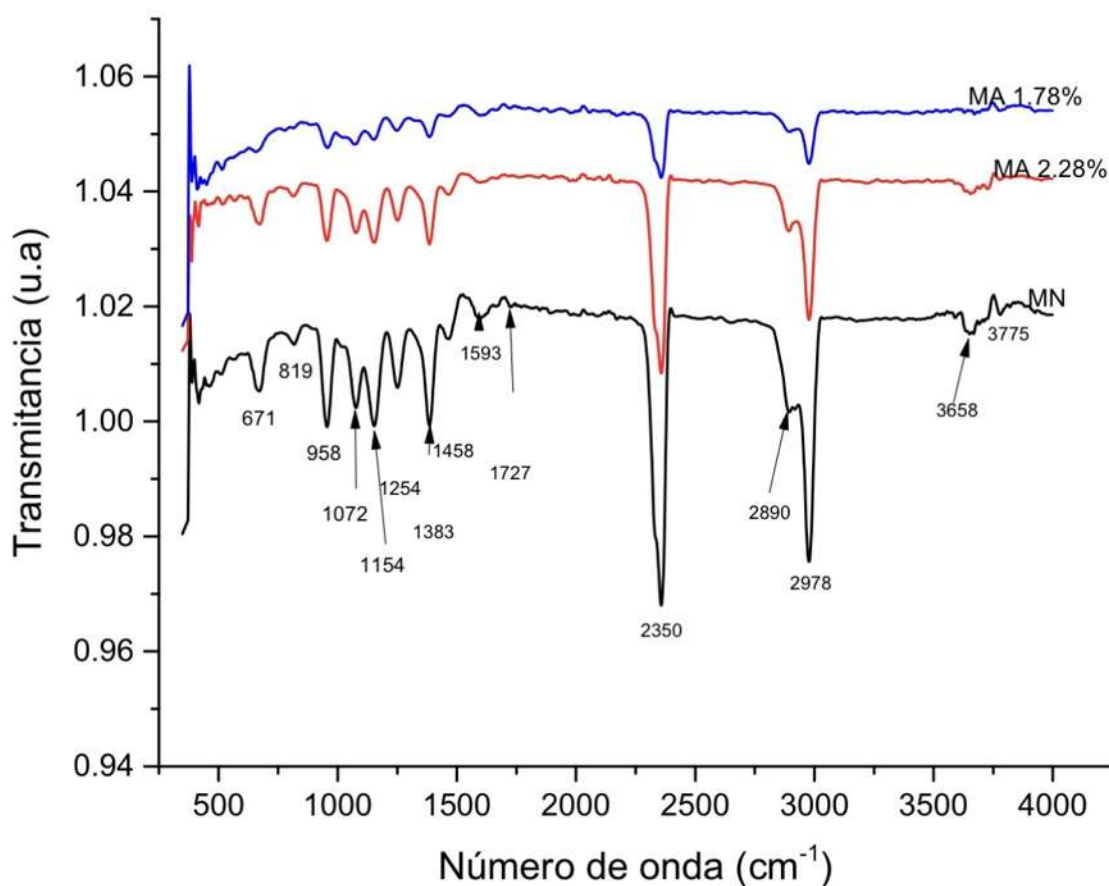


Figura 2. Espectros del mucílago nativo (MN) y del mucílago acetilado al 1.78 % (MA 1.78%) y 2.28 % (MA 2.28%) de *Opuntia atropes*, obtenidos mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

Se observó una banda en 2978 cm^{-1} la cual se relaciona con el estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos C–H correspondiente a metilenos y metilos de las estructuras de los azúcares (Manai *et al.*, 2023), presentes en las estructuras hidrocarbonadas de las cadenas de polisacáridos y en los grupos acetilo. La mayor intensidad de estas bandas en MA 1.78% y MN, en comparación con MA 2.28%, podría atribuirse a una mejor orientación molecular y mayor acoplamiento vibracional y no necesariamente a un aumento en el contenido de C–H (Smith, 2018).

Se observó una banda intensa cerca de 2350 cm^{-1} en los tres espectros; sin embargo, ésta se relaciona comúnmente con el CO_2 atmosférico absorbido y no representa una señal significativa del mucílago en sí. Su presencia se considera un artefacto ambiental común en espectros FTIR (Pavia *et al.*, 2014).

En mucílago proveniente de *Opuntia* es común observar una banda entre las regiones $1580\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ asociada a ácidos urónicos (grupos Coo^-) que provienen de pectinas o polisacáridos con ácido galacturónico, que se encuentran extensivamente en mucílago (Manai *et al.*, 2023). Se observó una banda débil en 1727 cm^{-1} C=O de grupos acetilo, lo cual podría corresponder a grupos acetilo en forma de enlaces éster en la estructura del polisacárido, así como también se observó una banda en 1593 cm^{-1} . En los espectros de los mucílago acetilados se detectaron ondulaciones tenues en esta región, sin embargo, su baja intensidad podría deberse a efectos estructurales secundarios, especialmente en MA 2.28%, donde se esperaría una mayor intensidad por su mayor grado de sustitución. Esto coincide con lo reportado por Sun *et al.* (2004), quienes indican que la baja intensidad de esta banda ($\sim 1727\text{ cm}^{-1}$) puede debilitarse o incluso desaparecer en función del entorno químico del polímero, especialmente en medios hidrofílicos o con bajo contenido de grupos éster, lo cual influye directamente en la polaridad y absorbancia del enlace C=O. A pesar de la baja intensidad de banda, la modificación química se confirma de manera cuantitativa mediante la titulación de grupos acetilo y los valores de grado de sustitución presentados en la Tabla 3, lo cual respalda la presencia de grupos acetilo en la estructura del polímero.

En el rango de $1450\text{--}1370\text{ cm}^{-1}$, se identificaron bandas de deformación (*bending*) que corresponden a los grupos CH_3 (metilo) y CH_2 (metileno), asociadas tanto a las unidades estructurales de los polisacáridos como a la incorporación de grupos acetilo ($-\text{COCH}_3$) en

la red polisacárida. Estas bandas se intensificaron ligeramente en el mucílago con menor grado de acetilación (MA 1.78%), lo que podría reflejar un equilibrio entre sustitución química y la conservación de la estructura, mientras que en MA 2.28% la señal fue más tenue, lo cual podría deberse a un mayor desorden estructural o pérdida del orden cristalino, efectos que han sido reportados en sistemas de celulosa modificada (Ciolacu *et al.*, 2011; Elanthikkal *et al.*, 2011).

Adicionalmente, en la zona de 1254 cm^{-1} se detectaron señales relacionadas con deformaciones de tipo $\delta\text{C-H}$, δCH_2 y $\delta\text{O-H}$, típicas en mucílagos y que aportan información adicional para una caracterización más completa del comportamiento vibracional de la estructura del polisacárido (Habibi *et al.*, 2009). Aquí se asocia a una señal secundaria del acetil que está conformando la estructura del polisacárido.

Finalmente, en la región de $1140\text{-}875\text{ cm}^{-1}$, conocida como la zona de huella digital de polisacáridos, se observaron múltiples vibraciones asociadas en 1154 cm^{-1} a la estructura C-O-C glucosídico, en 1072 cm^{-1} C-O de alcoholes y en 819 cm^{-1} característicos de los anillos azúcar y beta-enlaces (Manai *et al.*, 2023). En MA 2.28%, esta región presentó una notable disminución en la definición de las bandas, lo que puede indicar una mayor modificación estructural y pérdida de orden molecular. En comparación con MN y MA 1.78%, mantuvieron bandas más definidas, que reflejan una estructura parcialmente ordenada (Smith, 2018).

Por lo tanto, los resultados obtenidos por FTIR confirman la presencia de estructuras de polisacáridos típicas en el mucílago nativo de *O. atropes*, así como la incorporación parcial de grupos acetilo en las muestras modificadas. La comparación de los espectros indica que la acetilación al 1.78 % conservó en mayor medida la organización estructural del mucílago, mientras que la acetilación al 2.28 % generó cambios más evidentes en su estructura molecular, observados como una menor definición en regiones clave del espectro. Por lo tanto, estos resultados confirman que el proceso de acetilación indujo modificaciones estructurales en el mucílago.

11.4 Caracterización Fisicoquímica de los Yogures

11.4.1 pH de los yogures

En la Tabla 13 se presentan los valores de pH de los diferentes yogures formulados. El yogurt control mostró un pH de 4.57 ± 0.00 , siendo este valor significativamente superior ($p < 0.05$) en comparación con las demás formulaciones. Este resultado es esperable, dado que no contenía mucílago ni grenetina, que pudiesen influir en el comportamiento de la matriz láctea. Las formulaciones con mucílago nativo (M.N) y mucílago acetilado al 1.78% (M. Acet), ambos al 0.5 %, presentaron un pH de 4.47 ± 0.006 y 4.47 ± 0.00 respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas. Por lo que la modificación química mediante acetilación no tuvo un impacto notable en el pH del sistema. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza levemente ácida del mucílago de *O. atropes*, cuya capacidad de amortiguación no es lo suficientemente fuerte como para alterar el pH final del yogurt (Medina-Torres *et al.*, 2000; Sáenz *et al.*, 2004).

Tabla 13. Valores de pH de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	pH
Control	$4.57^a \pm 0$
M.N	$4.47^b \pm 0.006$
M.N + Gren	$4.49^c \pm 0$
M. Acet	$4.47^b \pm 0$
M. Acet + Gren	$4.47^b \pm 0$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$). M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

Por otro lado, la inclusión de grenetina combinada con el mucílago (M.N + Grenetina) resultó en un pH ligeramente superior (4.49 ± 0.00), siendo estadísticamente diferente de los otros tratamientos ($p < 0.05$). Este incremento leve podría ser consecuencia de la interacción proteica de la grenetina con compuestos ácidos presentes en la leche o en el mucílago, dado que la grenetina es una proteína hidrolizada con propiedades anfóteras, capaz de participar en reacciones ácido-base, especialmente en sistemas con un pH cercano al punto isoelectrónico de las proteínas lácteas (Foegeding & Davis, 2011; Gómez-Guillén *et al.*, 2011).

Se ha observado que la adición de polisacáridos o gomas vegetales a sistemas fermentados como el yogurt puede influir ligeramente en los valores de pH, en función del tipo de fibra incorporada y su comportamiento en la matriz láctea (Staffolo *et al.*, 2004). No obstante, en el presente estudio, las diferencias observadas, aunque estadísticamente significativas, son menores a una unidad de pH, por lo que no compromete la viabilidad del producto ni altera el rango óptimo de pH para un yogurt (pH 4.0–4.6).

Estos resultados respaldan el uso del mucílago de *O. atropes*, tanto en su forma nativa como acetilada, como un ingrediente funcional que no altera significativamente el pH del producto final, manteniéndose dentro de los parámetros aceptables para su conservación y seguridad microbiológica.

11.4.2 Color de los yogures

En la Tabla 14 se presentan los promedios de los valores obtenidos según el modelo CIELAB para las distintas formulaciones de los yogures.

Tabla 14. Valores del modelo CIELAB para las distintas formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
Control	67.91 ^{bc} $\pm$ 2.96	-1.41 ^a $\pm$ 0.16	2.49 ^c $\pm$ 0.34	3.50 ^c $\pm$ 0.45	117.73 ^a $\pm$ 4.45
M.N	66.40 ^c $\pm$ 2.11	-2.00 ^c $\pm$ 0.07	4.75 ^a $\pm$ 0.19	5.19 ^a $\pm$ 0.16	112.76 ^c $\pm$ 0.52
M.N + Gren	64.13 ^c $\pm$ 2.46	-2.05 ^c $\pm$ 0.35	5.05 ^a $\pm$ 0.12	5.44 ^a $\pm$ 0.05	110.19 ^c $\pm$ 0.94
M. Acet	73.58 ^a $\pm$ 0.32	-1.82 ^b $\pm$ 0.01	3.60 ^b $\pm$ 0.05	4.08 ^b $\pm$ 0.01	116.45 ^b $\pm$ 0.27
M. Acet + Gren	67.24 ^b $\pm$ 0.52	-1.56 ^a $\pm$ 0.02	3.32 ^b $\pm$ 0.01	3.68 ^c $\pm$ 0.02	115.31 ^b $\pm$ 0.21

M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

A continuación, se describen brevemente los cambios observados en función de la adición de mucílago de *O. atropes*, en su forma nativa y acetilada, así como de la grenetina.

- L^* (luminosidad) = La formulación que contenía “*M. Acet*” presentó el valor más elevado de L^* , lo que indica una apariencia más clara. Por otro lado, la combinación de “*M.N + Gren*” resultó en una disminución de la luminosidad, sugiriendo un efecto opacante.
- a^* (rojo-verde) = Todos los tratamientos presentaron valores negativos, lo que indica una ligera tonalidad verdosa, siendo más evidente en las formulaciones con mucílago nativo.
- b^* (amarillo-azul) = Todos los yogures presentaron una tendencia hacia el amarillo, con valores más altos en las formulaciones que contenían mucílago nativo, especialmente cuando se combinaron con grenetina.
- C^* (cromaticidad) = Los yogures elaborados con mucílago nativo presentaron una mayor saturación de color, mientras que aquellos formulados con mucílago acetilado mostraron una menor intensidad de color.

- h° (ángulo de tono “hue”) = Las muestras se ubicaron en el cuadrante amarillo-verdoso. Los valores más bajos (más cercanos al amarillo puro) se registraron en los tratamientos que incluían mucílago nativo y grenetina.

En general, los resultados sugieren que la incorporación del mucílago de *O. atropes*, tanto en su forma nativa como acetilada, influyó en los parámetros cromáticos del yogurt, siendo más visible con el mucílago nativo, el cual presenta mayor contenido de pigmentos naturales (Sáenz *et al.*, 2004). Asimismo, la incorporación de grenetina en la formulación también pudo influir en los parámetros cromáticos observados.

Belata-López (2023) reportó que la adición de mucílago de *O. ficus-indica* al yogurt disminuye la luminosidad (L^*) e incrementa los valores de b^* , lo cual coincide con el efecto observado en las formulaciones con mucílago nativo. Asimismo, García-Barradas *et al.* (2022) señalaron que la modificación química del mucílago de *O. ficus-indica* mediante acetilación puede alterar sus propiedades fisicoquímicas, incluyendo cambios en los parámetros de color, lo cual podría explicar la apariencia más clara observada en el tratamiento “*M. Acet*”.

Ścibisz & Ziarno (2023) demostraron que la composición de la matriz fermentada, especialmente su contenido proteico, influye en la estabilidad cromática de los pigmentos naturales y en la percepción de su color en el yogurt. Esto podría explicar la menor luminosidad y mayor saturación de las formulaciones que combinaban mucílago nativo con grenetina, por posibles interacciones entre esta proteína y los compuestos pigmentarios presentes en el sistema, los cuales podrían incluir trazas de betalainas, flavonoides oxidados o compuestos fenólicos residuales que tiene el nopal y que pueden permanecer en el mucílago (Sáenz *et al.*, 2004) cuando se extrae sin procesos de purificación. Staffolo *et al.* (2004) reportaron que la adición de compuestos vegetales como fibra dietética puede modificar las características visuales del yogurt, debido a interacciones con la matriz del producto que afectan la dispersión de la luz. Este comportamiento también se observa en hidrocoloides vegetales como los mucílagos, especialmente en sistemas fermentados que contienen proteínas.

Estos resultados demuestran el potencial del mucílago de *O. atropes* como un ingrediente funcional que puede modificar ligeramente la apariencia del yogurt sin

comprometer su aceptabilidad visual, abriendo así oportunidades innovadoras para el desarrollo de productos diferenciados por su coloración natural.

11.4.3 Actividad de agua de los yogures

Se determinó la cantidad de agua disponible en los cinco diferentes yogures. Los promedios de los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 15. La actividad de agua (A_w) de los yogures se mantuvo en un rango reducido, oscilando entre 0.976 y 0.979. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los distintos tratamientos, lo que sugiere que la incorporación de mucílago ya sea en su forma nativa o acetilada, así como la adición de grenetina, no afectaron de manera significativa la actividad de agua del producto final.

Estos valores coinciden con los reportados en yogures comerciales, que generalmente tienen A_w entre 0.975 y 0.982. Esta alta disponibilidad de agua no representa un riesgo microbiológico, siempre que el producto se mantenga en condiciones de refrigeración y con un pH ácido (Doyle *et al.*, 2019).

Algunos estudios han mostrado que la adición de hidrocoloides, como mucílagos, gomas y grenetina puede mejorar significativamente la textura del producto y su capacidad de absorción de agua, sin afectar de manera significativa la A_w (Doyle *et al.*, 2019).

Tabla 15. Actividad de agua de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	A_w
Control	$0.979^a \pm 0.0015$
M.N	$0.976^a \pm 0.0006$
M.N + Gren	$0.977^a \pm 0.0006$
M. Acet	$0.977^a \pm 0.0010$
M. Acet + Gren	$0.977^a \pm 0.0006$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$). M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

11.4.4 Viscosidad de los yogures

En la Tabla 16 se muestran los resultados de la viscosidad de los yogures evaluados a 10 rpm. La viscosidad de los yogures presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los distintos tratamientos. El yogurt control mostró la viscosidad más baja, con un valor de 198.2 ± 8.697 cP. En cambio, la adición de mucílago nativo y grenetina incrementó notablemente este parámetro, alcanzando el valor más alto de 392.7 ± 8.696 cP. La formulación que contenía mucílago nativo sin grenetina también mostró un aumento significativo en comparación con el control, con una viscosidad de 236.6 ± 1.931 cP.

El yogurt con mucílago acetilado al 1.78 % presentó una viscosidad menor (218.4 ± 7.630 cP) en comparación con el nativo, lo cual concuerda con estudios previos que describen que la acetilación reduce la viscosidad de soluciones con polisacáridos al disminuir las interacciones intermoleculares (García-Barradas *et al.*, 2022). Sin embargo, en nuestro estudio cuando se combinó el mucílago acetilado con grenetina, la viscosidad aumentó considerablemente (308.3 ± 0.971 cP), sugiriendo un efecto sinérgico entre la proteína gelificante y el hidrocoloide vegetal.

Tabla 16. Evaluación de la viscosidad (10 rpm) de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	Viscosidad (cP)
Control	$198.2^a \pm 8.69$
M.N	$236.6^c \pm 1.93$
M.N + Gren	$392.7^e \pm 8.69$
M. Acet	$218.4^b \pm 7.63$
M. Acet + Gren	$308.3^d \pm 0.97$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$). M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

Estos datos son similares a los reportados por Herrera-Enciso *et al.* (2021), quienes observaron un aumento en la viscosidad al incorporar mucílago de *O. ficus-indica* como espesante en un yogurt bebible. Además, Julmohammad *et al.* (2025) señalaron que la combinación de grenetina con polisacáridos en matrices lácteas genera estructuras más densas y resistentes al flujo, lo que incrementa la viscosidad.

A partir de estos resultados, se observa que el mucílago de *O. atropes*, tanto en su forma nativa como modificada, presenta propiedades que permiten su aplicación como un ingrediente funcional en productos lácteos. La capacidad de ajustar la viscosidad mediante modificaciones químicas o en combinación con grenetina representa una ventaja tecnológica importante para la formulación de yogures con características específicas de textura.

11.4.5 Grado de sinéresis de los yogures

Se determinó el porcentaje de sinéresis de los distintos yogures empleando la fórmula correspondiente y el promedio de cada uno se muestra en la Tabla 17.

El análisis del grado de sinéresis mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las diversas formulaciones. El yogurt control presentó el mayor porcentaje de sinéresis (84.3847 ± 0.951 %), mientras que las formulaciones que contenían mucílago acetilado (80.3868 ± 0.335 %) y su combinación con grenetina (79.9273 ± 0.356 %) mostraron los valores más bajos, lo que indica una mejora en la estabilidad del sistema.

Los altos niveles de sinéresis observados en todos los tratamientos pueden atribuirse, en parte, a las condiciones experimentales empleadas, ya que la prueba se llevó a cabo a temperatura ambiente y con una centrífuga sin control térmico. Este aspecto ha sido reportado como un factor que incrementa la separación de suero durante el análisis, dado que temperaturas elevadas pueden alterar la microestructura del gel y favorecer la liberación de la fase líquida (; Sodini *et al.*, 2005; Gilbert *et al.*, 2021). Además, algunos yogures comerciales analizados bajo las mismas condiciones presentaron una sinéresis superior al 70 %, lo que facilita la comparación con los sistemas evaluados en este estudio. No obstante, para futuras investigaciones, sería conveniente utilizar centrífugas refrigeradas que simulen de manera más precisa las condiciones reales de almacenamiento del producto (~ 8 °C), con el objetivo de obtener resultados más representativos del comportamiento del sistema bajo refrigeración.

Tabla 17. Porcentaje de sinéresis de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	Sinéresis (%)
Control	84.3847 ^a ± 0.95
M.N	82.7340 ^a ± 0.58
M.N + Gren	82.3191 ^{ab} ± 0.86
M. Acet	80.3868 ^c ± 0.33
M. Acet + Gren	79.9273 ^c ± 0.35

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$). M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

En cuanto al efecto de los ingredientes funcionales, el mucílago de *O. atropes*, tanto en su forma nativa como acetilada al 1.78 %, redujo la sinéresis en comparación con el control. Este comportamiento es similar a lo reportado por Herrera-Enciso *et al.* (2021), quienes observaron que el mucílago de *O. ficus-indica* actúa como un estabilizante natural al formar una red más densa en la matriz del yogurt, mejorando así la retención de agua.

Cuando el mucílago se combinó con grenetina, la sinéresis fue aún menor, lo que sugiere un efecto sinérgico entre los polisacáridos y las proteínas gelificantes. Estas interacciones favorecen la formación de redes tridimensionales más compactas y con una mayor resistencia a la separación de fases, tal como se describe en el trabajo de Julmohammad *et al.* (2025).

Estos resultados sugieren que tanto el mucílago nativo de *O. atropes* como el mucílago acetilado pueden ser empleados como agentes estabilizantes en yogures, mejorando su retención de agua, incluso bajo condiciones de análisis poco favorables.

11.4.6 Determinación de acidez de los yogures

Se evaluó el porcentaje de acidez que presentan los diferentes yogures utilizando la fórmula correspondiente y el promedio se muestra en la Tabla 18.

Los valores de acidez, expresados como porcentaje de ácido láctico, mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos analizados. La formulación que combinó mucílago acetilado con grenetina obtuvo el valor más alto (0.87 ± 0.012 %), mientras que el yogurt que contenía solo mucílago acetilado sin grenetina presentó el valor más bajo (0.82 ± 0.006 %). El yogurt control presentó un valor intermedio (0.83 ± 0.006 %), dentro del rango reportado para yogures naturales (0.70–1.20 %) (Doyle *et al.*, 2019).

La formulación con mucílago nativo presentó un ligero aumento en la acidez (0.86 ± 0.010 %) y este efecto fue más evidente al combinarse con grenetina. Este incremento podría deberse a una mayor retención de lactosa en la matriz del yogurt, lo que favorece la actividad de las bacterias ácido-lácticas incluso después de la fermentación. Julmohammad *et al.* (2025) señalaron que la presencia de estabilizantes como grenetina e inulina puede generar una red más densa en la matriz del yogurt, lo que puede prolongar la actividad bacteriana y contribuye a un incremento en la acidez.

Tabla 18. Porcentaje de acidez de las diferentes formulaciones de los yogures elaborados.

Yogurt	Acidez (%)
Control	$0.83^a \pm 0.006$
M.N	$0.86^b \pm 0.010$
M.N + Gren	$0.84^{ab} \pm 0.010$
M. Acet	$0.82^a \pm 0.006$
M. Acet + Gren	$0.87^c \pm 0.012$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$). M.N: Mucílago nativo; M.N + Gren: Mucílago nativo y grenetina; M. Acet: Mucílago acetilado al 1.78 %; M. Acet + Gren: Mucílago acetilado y grenetina.

Por otro lado, la menor acidez observada en el yogurt con mucílago acetilado (sin la presencia de grenetina) podría atribuirse a que las modificaciones químicas, como la acetilación, alteran la interacción del mucílago con la matriz del yogurt, limitando el acceso de las bacterias a los sustratos fermentables. García-Barradas *et al.* (2022) reportaron que la

modificación química del mucílago de *O. ficus-indica* puede alterar significativamente sus propiedades fisicoquímicas y su funcionalidad, lo cual podría influir indirectamente en el proceso de fermentación del producto.

Es importante mencionar que el análisis de acidez se llevó a cabo aproximadamente 21–22 horas después de finalizar la fermentación, lo que podría haber permitido una leve continuación del proceso de fermentación, especialmente si las bacterias no fueron completamente inactivadas por el enfriamiento. Este fenómeno es conocido como “*post-acidificación*” y ha sido descrito por Tamine & Robinson (1999), quienes explican que incluso bajo condiciones de refrigeración puede observarse un ligero aumento en acidez durante las primeras 24–48 horas posteriores a la fermentación.

12. CONCLUSIONES

La presente investigación cumplió de manera satisfactoria el objetivo general propuesto: a través del diseño experimental desarrollado fue posible demostrar que la modificación por acetilación del mucílago de *Opuntia atropes* generó cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago, y evaluar su aplicación en una matriz alimentaria tipo yogurt bajo en grasa y a la vez haciéndolo potencialmente más eficiente como aditivo alimentario natural.

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes de la presente investigación: i) la extracción optimizada del mucílago permitió obtener una materia prima funcional a partir de una especie nativa de nopal con escaso aprovechamiento industrial. ii: los diferentes grados de acetilación generaron modificaciones estructurales que permitió variaciones el pH, la viscosidad, la actividad de agua, así como en su capacidad de absorción de agua y aceite. iii) estas transformaciones se corroboraron mediante caracterización espectroscópica (FTIR) y análisis fisicoquímico, observándose una mejora significativa en ciertas propiedades tecnológicas que respaldan su uso en formulaciones alimentarias.

De manera particular, el mucílago acetilado al 1.78 % presentó un perfil funcional más adecuado para su aplicación como espesante y estabilizante, siendo incorporado exitosamente en la formulación de una bebida tipo yogurt bajo en grasa. Su incorporación en combinación con grenetina permitió mejorar parámetros como la viscosidad y reducir la sinéresis del producto final, sin afectar propiedades fundamentales como el pH, la acidez y la actividad de agua.

Este trabajo aporta evidencia sobre el uso del mucílago de *Opuntia atropes* como un ingrediente funcional, destacando su valor como un recurso vegetal poco aprovechado y su importancia para el sector agroindustrial del nopal en Michoacán. La acetilación controlada se plantea como una estrategia viable de modificación estructural, que amplía las posibilidades de aplicación del mucílago en sistemas alimentarios reales y con potencial de escalamiento tecnológico.

En general, esta investigación aporta evidencia científica sólida y aplicable sobre la viabilidad de transformar biopolímeros vegetales mediante modificaciones químicas dirigidas, en favor de la innovación tecnológica en alimentos funcionales de nueva generación.

13. REFERENCIAS

- Agate, S., Williams, A., Dougherty, J., Velez, O.D., Pal, L. (2023). Polymer Color Intelligence: Effect of materials, instruments, and measurement Techniques – a review. *ACS Omega*, 8(26), 23257–23270. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08252>
- Anderson, E. (2001). The cactus family. Timber Press, Portland, Oregon.
- AOAC. (2005). Official methods of analysis of the AOAC. 18th edition. Ed. By the Association of Official Analytical Chemists International. USA.
- Ayadi, M.A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus-indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1):40-47. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.01.003>
- Babio, N., Mena-Sánchez, G., Salas-Salvadó, J. (2017). Más allá del valor nutricional del yogur: ¿un indicador de la calidad de la dieta? - Beyond the nutritional value of yogurt: a diet quality indicator?. *Nutrición Hospitalaria*, 34(4):26.30. <https://doi.org/10.20960/nh.1567>
- Bartolo, R.L.M. (2016). *Aplicación de hidrocoloides en la elaboración de yogurt* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo Perú - Facultad de Ciencias Agropecuarias]. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f161e497-f687-461d-9158-1d1c42a77543/content>
- Belata-López, N.I. (2023). *Evaluación de yogurt elaborado con mucílago de tuna (Opuntia ficus-indica) como espesante natural* [Tesis de grado/licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/0c1113b4-4895-4853-b6aa-8faa3bc22297>
- Bocarando-Guzmán, M.D., Luna-Suárez, S., Hernández-Cázares, A.S., Herrera-Corredor, J. A., Hidalgo-Contreras, J.V., Ríos-Corripio, M.A. (2022). Comparison of the physicochemical and functional properties of flour and protein isolate from moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *International Journal of Food Properties*, 25(1):733–747. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2058533>
- Bolade, M.K., Oni, J.O. (2016). Influence of acetylation on the physicochemical properties of composited starches from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) and water yam

- (*Dioscorea alata* L.). *African Journal of Biotechnology*, 14(51), 3340–3349.
<https://doi.org/10.5897/AJB2015.14881>
- Bravo-Hollis, H., Sánchez-Mejorada, H. (1978). Las cactáceas de México. 2ª ed., UNAM. México.
- Britton, N.L., Rose J.N. (1963). The Cactácea. Descriptions and Illustrations of Plants of the Cactus Family. Vols. 1 and 2. Courier Dover Publications Inc., New York.
- Cárdenas, B.A., Goycoolea, V.F. (2001). Propiedades gelificantes de la pectina del nopal. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.
- Chávez-Moreno, C.K., Tecante, A., Casas, A. (2009). The *Opuntia* (Cactaceae) and Dactylopius (Hemiptera: Dactylopiidae) in México: a historical perspective of use, interaction and distribution. *Biodiversity and Conservation*, 18(13):3337-3355.
<https://doi.org/10.1007/s10531-009-9647-x>
- CHNSpec. (s.f.). *Why use CIE-Lab color metrics*. <https://www.chnspec.net/es/Spanish/Why-Use-CIE-Lab-Color-Metrics.html>
- Ciolacu, D., Ciolacu, F., Popa, V.I. (2011). Amorphous Cellulose – Structure and Characterization. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45(1-2), 13-21.
[https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2\(2011\)/p.13-21.pdf](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2(2011)/p.13-21.pdf)
- Cormier, H., Thifault, É., Garneau, V., Tremblay, A., Drapeau, V., Pérusse, L., Vohl, M. (2015). Association between yogurt consumption, dietary patterns, and cardio-metabolic risk factors. *European Journal of Nutrition*. 55(2):577-587.
<https://doi.org/10.1007/s00394-015-0878-1>
- Cortina, A.E. (2020). *Propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal químicamente modificado* [Tesis de maestría en Ciencias Alimentarias, Universidad Veracruzana - Instituto de Ciencias Básicas].
<https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/50800/EstebanCortinaAlejandro.pdf?sequence=1>
- Diez, L.B., Pérez Zamora, C.M., Michaluk, A.G., Núñez, M.B., Torres, C.A., González, A. M. (2020). Mucílago de *Opuntia ficus indica* como potencial excipiente natural de productos cosméticos. *Naturalia Patagónica*, 16: 143-157.
<https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/169874/NaturaliaPatagónica%20Vol.1.%2016%20%282020%29%20143->

157.%20Aplicaciones%20del%20Mucílago%20de%20Opuntia%20ficus%20indica.
.pdf?sequence=5&isAllowed=y

- Dominguez-Martínez, B.M., Martínez-Flores, H.E., Berrios, J.J., Otoni, C.G., Wood, D., Velazquez, G. (2017). Physical characterization of biodegradable films based on chitosan, polyvinyl alcohol and *Opuntia* mucilage. *Journal of Polymers and Environment*, 25:683-691. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(3):683–691. [https://doi.org/ 10.1007/s10924-016-0851-y](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0851-y)
- Doyle, M.P., Diez-Gonzalez, F., Hill, C. (2019). Food microbiology: Fundamentals and frontiers (5th ed.). ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555819972>
- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS), Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Dusemund, B., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambré, C., Leblanc, J.-C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Parent-Massin, D., Oskarsson, A., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Wright, M., ... Woutersen, R.A. (2017). Re-evaluation of oxidised starch (E 1404), monostarch phosphate (E 1410), distarch phosphate (E 1412), phosphated distarch phosphate (E 1413), acetylated distarch phosphate (E 1414), acetylated starch (E 1420), acetylated distarch adipate (E 1422), hydroxypropyl starch (E 1440), hydroxypropyl distarch phosphate (E 1442), starch sodium octenyl succinate (E 1450), acetylated oxidised starch (E 1451) and starch aluminium octenyl succinate (E 1452) as food additives. *EFSA Journal*, 15(10):e04911. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4911>
- El método Kjeldahl*. (s.f.). <https://www.gerhardt.de/es/know-how/metodos-analiticos/el-metodo-kjeldahl/>
- Elanthikkal, S., Gopalakrishnapanicker, U., Varghese, S., Guthrie, J.T. (2011). Cellulose microfibrils produced from banana plant wastes: Isolation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 80(3):852-859. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.043>
- Food and Drug Administration, HHS. (s. f.). *Authenticated U.S. Government Information - GPO*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2012-title21-vol3/pdf/CFR-2012-title21-vol3-sec172-892.pdf>

- Forni, E., Penci, M., Polesello, A. (1994). A preliminary characterization of some pectins from quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.) and prickly pear (*Opuntia ficus indica*) peel. *Carbohydrate Polymers*, 23(4):231–234. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(94\)90183-x](https://doi.org/10.1016/0144-8617(94)90183-x)
- Farías-Cervantes, V.S., Chávez-Rodríguez, A., Delgado-Licon, E., Aguilar, J., Medrano-Roldan, H., Andrade-González, I. (2016). Effect of Spray Drying of Agave Fructans, Nopal Mucilage and Aloe Vera Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4):e13027. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13027>
- Foegeding, E.A., Davis, J.P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food Hydrocolloids*, 25(8):1853–1864. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.05.008>
- Flores-Valdez, C. (2003). *Importancia del nopal*. pp. 1-18. In: C. A. Flores Valdez, ed. Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización. 1ª Ed. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. México. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/f13b4151-7e89-4298-87d3-4efe2791a494/content>
- García-Barradas, O., Esteban-Cortina, A., Mendoza-Lopez, M.R., Ortiz-Basurto, R.I., Díaz-Ramos, D.I., Jiménez-Fernández, M. (2022). Chemical modification of *Opuntia ficus-indica* mucilage: characterization, physicochemical, and functional properties. *Polymer Bulletin*, 80(8):8783–8798. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04474-x>
- García, N.N. (2017). Optimización de la extracción acuosa y secado del biopolímero de nopal (*Opuntia ficus-indica*) [Tesis de maestría en Ciencias Agropecuarias, Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Agronómicas]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151051/Optimizaci3n-de-la-extraccion-acuosa-y-secado-del-biopolimero-de-nopal-%28Opuntia-Ficus-Indica%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gharibzahedi, S.M.T., Razavi, S.H., Mousavi, S.M. (2013). *Psyllium husk gum: An attractive carbohydrate biopolymer for the production of stable canthaxanthin emulsions*. *Carbohydrate Polymers*, 92(2):2002–2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.083>
- Gibson, C.A., Nobel, S.P. (1990). *The cactus primer*. First Harvard University Press.

196-199 pp.

- Gilbert, A., Rioux, L., St-Gelais, D., Turgeon, S. (2021). Smoothing temperature and ratio of casein to whey protein: Two tools to improve nonfat stirred yogurt properties. *Journal of Dairy Science*, 104(10), 10485–10499. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20040>
- Gómez-Guillén, M., Giménez, B., López-Caballero, M., Montero, M. (2011). Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. *Food Hydrocolloids*, 25(8):1813–1827. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.007>
- González-Sandoval, D.C., Sosa, B.L., Martínez-Ávila, G.C.G., Fuentes, H.R., Abarca, V.H. A., Rojas, R. (2019). Formulation and Characterization of Edible Films Based on Organic Mucilage from Mexican *Opuntia ficus-indica*. *Coatings*, 9(8):506. <https://doi.org/10.3390/coatings9080506>
- Guardiola d.L.A.J. (2018). *Extracción y Caracterización de Mucílago del Nopal (Opuntia ficus indica (L.) Miller) de Cinco Cultivares, en Tres Estados de Maduración* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de Agronomía]. <http://eprints.uanl.mx/18573/1/1080289242.pdf>
- Guzmán, U., Arias, S., Dávila, P. (2003). Catálogo de cactáceas mexicanas. UNAM y Consejo Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO. México.
- Habibi, Y., Mahrouz, M., Vignon, M.R. (2009). Microfibrillated cellulose from the peel of prickly pear fruits. *Food Chemistry*, 115(2), 423–429. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.034>
- Herrera-Enciso, V., Herrera-Enciso, F., Ojeda, E.R. (2021). *Aplicación del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica) como espesante en yogurt bebible (Application of nopal mucilago (Opuntia ficus-indica) as thickener in drinking yogurt)*. Pistas Educativas. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2636/2022>
- Hu, Z., Sun, J., Jin, L., Zong, T., Duan, Y., Zhou, H., Zhou, W., Li, G. (2022). Acetylation Modification, Characterization, and Anticomplementary Activity of Polysaccharides from *Rhododendron dauricum* Leaves. *Polymers*, 14(15):3130. <https://doi.org/10.3390/polym14153130>
- Huang, J., Schols, H., Jin, Z., Sulmann, E., Voragen, A. (2007). Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea, cowpea and chickpea starches after

- modification with acetic anhydride and vinyl acetate. *Carbohydrate Polymers*, 67(1), 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.04.011>
- IMSS. Instituto Mexicano Del Seguro Social. (2018). *Nopal, auxiliar en el control de la diabetes y la hiperglucemia*. <https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265#:~:text=Explic%C3%B3%20que%20el%20nopal%20contiene,y%20el%20humo%20del%20cigarro>.
- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives FAO - Joint Secretariat. (2015). FAO/WHO. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/jecfa/2015_02_22_Modified_Starches.pdf
- Julmohammad, N., Mohd Zarir, N.S., Yew Sen, H., Huda, N., Haque Akanda, M.J., Dona Sintang, M. (2025). Effects of gelatin and inulin on the physicochemical and sensory properties of low-fat yogurt. *International Journal of Food Science*, 2025, 3934220. <https://doi.org/10.37934/sijsfa.1.1.1721>
- Kacuráková, M., Wilson, R.H. (2001). Developments in mid-infrared FT-IR spectroscopy of selected carbohydrates. *Carbohydrate Polymers*, 44(4):291-303. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(00\)00245-9](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(00)00245-9)
- Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., Karim, A.A. (2012). Functional properties of chemically modified starches. *Food Science and Nutrition*, 2(1):28–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
- Konował, E., Sulej-Chojnacka, J., Prochaska, K. (2024). New derivatives of modified starch for food technology. *Molecules*, 29(14):3292. <https://doi.org/10.3390/molecules29143292>
- Lawal, O.S., Adebawale, K.O. (2005). Physicochemical characteristics and thermal properties of chemically modified jack bean (*Canavalia ensiformis*) starch. *Carbohydrate Polymers*, 60(3), 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.011>
- Luna–Sosa, B. (2019). *Formulación y caracterización de películas comestibles de mucílagos hidropónicos de nopal (Opuntia spp.) sobre manzanas golden* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía]. <http://eprints.uanl.mx/18572/1/1080289243.pdf>

- Luna-Zapién, E.A., Zegbe, J.A., Meza-Velázquez, J.A., Minjares-Fuentes, R. (2023). Mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) y su aplicación como aditivo alimentario: una visión general. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(1):51. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.1.51>
- Mannai, F., Mechi, L., Alimi, F., Alsukaibi, A.K.D., Belgacem, M.N., Moussaoui, Y. (2023). Biodegradable composite films based on mucilage from *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): Microstructural, functional and thermal properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126456.
- Martínez, F.H.E., Garnica, R.M.G. (2021). Georreferenciación y caracterización de cinco especies silvestres de *Opuntia* localizadas en Michoacán. En: “*Opuntia Aportaciones a su aprovechamiento*”, editores: Liberato Portillo, Rafael S., Vigueras A.L., Romo R de S. Editorial de la Universidad de Guadalajara. ISBN: 978-607-571-281-5.
- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5):417–424. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(00)00015-1)
- Mejía, A.A. (2022). *Análisis de las propiedades funcionales y fisicoquímicas de mezclas goma de mezquite/mucílago de nopal* [Tesis de licenciatura, UAEM - Facultad de Química]. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/112923/Tesis%20Araceli%20Mejía.pdf?sequence=2>
- Nobel, P.S. (1998). *Los incomparables agaves y cactus*. Ed. Trillas. México.
- Norma Oficial Mexicana. (1983). NMX-F-444-1983. *Alimentos. Yogur o Leche Búlgara*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Ojogbo, E., Ogunsona, E., Mekonnen, T. (2020). Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. *Materials Today Sustainability*, 7–8: 100028. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100028>
- Orozco, S.E. (2017). Elaboración y caracterización de películas de mucílago de nopal-pectina: Efecto de la concentración del mucílago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Estado de México, México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/67766>

- Ornelas, N.J.L. (2011). *Mejoramiento del método de extracción del mucílago de nopal Opuntia ficus indica y evaluación de sus propiedades de viscosidad* [Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/16995/FQFB-L-2011-0221.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Panahi, S., Fernandez, M.A., Marette, A., Tremblay, A. (2017). Yogurt, diet quality and lifestyle factors. *European Journal of Clinical Nutrition*, 71(5), May 2017, p. 573. *Gale Academic OneFile*. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.214>
- Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S., Vyvyan, J.R. (2014). Introduction to spectroscopy (5th ed.). *Cengage Learning*.
- Ponce-Luna, A., Pérez-Escalante, E., García-Curiel, L., Hernández-Hernández, A.A., Contreras-López, E., Pérez-Flores, J.G. (2023). Potencial del Nopal (*Opuntia Ficus-indica*) para su incursión en la industria de la confitería: una breve revisión. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8, 491-500. <https://idcyta.uanl.mx/index.php/i/article/download/66/61>
- Portillo, L., Soltero, R., Vigueras, A., De Lourdes Romo Campos, R. (2021). *Opuntia*. Aportaciones a su conocimiento y aprovechamiento. Editorial de la Universidad de Guadalajara. ISBN: 978-607-571-281-5.
- Poon, J.J., Cheok, C.Y., Tan, M.C. (2023). Optimization of Bioplastic Film from Kapok Cellulose Production at Different Acetylation. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(6), 2576–2588. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03134-z>
- Prajapati, V.D., Jani, G.K., Moradiya, N.G., Randeria, N.P. (2013). Pharmaceutical applications of various natural gums, mucilages and their modified forms. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1685–1699. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.021>
- PREANU - Universidad de Costa Rica. (2023). *El yogurt y sus características nutricionales*. PREANU. <https://nutricionparavivirmejor.ucr.ac.cr/index.php/2023/01/24/rincon-nutricional/>
- Prieto-Méndez, J., Trejo-Cárdenas, C.L., Prieto-García, F., Méndez-Marzo, M.A., Bello-Pérez, L.A., Román-Gutiérrez, A.D. (2010). Acetilación y caracterización del

- almidón de cebada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales - ITSON*.
<https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/181/117>
- Rangan, A.M., Flood, V.M., Denyer, G., Webb, K., Marks, G.B. (2012). Dairy consumption and diet quality in a sample of Australian children. *Journal of the American College of Nutrition*, 31(3), 185-193. <https://doi.org/10.1080/07315724.2012.10720026>
- Reyes, J., Ludeña, F. (2015). Evaluación de las características físico-químicas, microbiológicas y sensoriales de un yogur elaborado con sucralosa y estevia. *Revista Politécnica*, 36(2). <https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773648001.pdf>
- Rodríguez, G.S. (2010). Efecto de la incorporación de mucílago de nopal sobre las propiedades propiedades sensoriales y texturales de una pasta a base de huitlacoche (*Ustilago maydis*). [Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Rodríguez-González, S., Martínez-Flores, H.E., Chávez-Moreno, C.K., Macías-Rodríguez, L.I., Zavala-Mendoza, E., Garnica-Romo, M., Chacón-García, L. (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*, 37(3), 285–292. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12084>
- Rosida, D.F., Yuliani, R., Djajati, S. (2019). Modification of colocasia esculenta starch with acetylation process. En *NST- Proceedings: 4th International Seminar of Research Month*. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Surabaya. East Java, Indonesia. <https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/94666946/209-libre.pdf>
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro, B. (2004). *Opuntia* spp. mucilages: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57(3):275–290. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García de Cortázar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez-Félix, A., Sepúlveda, E., Varnero, M.T. (2006). *Utilización Agroindustrial del Nopal*. FAO. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120301/Utilizacion-agroindustrial-del-nopal.pdf>
- SAERT. (1994). *Cactus as supplementary food and forage support component of SAERT*. Volume VII prepared by UNDP, ECA/FAO. The Regional Government of Tigray and TDA.

- Ścibisz, I., Ziarno, M. (2023). Effect of Fermented Matrix on the Color and Stability of Strawberry and Blueberry Anthocyanins during the Storage of Fruit Yogurts and Soy-Based and Bean-Based Fruit Yogurt Alternatives. *Molecules*, 28(17):6222. <https://doi.org/10.3390/molecules28176222>
- Secretaría De Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *El nopal mexicano: Un tesoro nutricional de la tierra*. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-mexicano-un-tesoro-nutricional-de-la-tierra>
- Secretaría de Salud (SSA). (2002). NOM-185-SSA1-2002: Mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias. Ciudad de México: SSA.
- Secretaría Nacional De Inspección y Certificación de Semillas. (2017). *Nopales, cultivo emblemático de México*. gob.mx. <https://www.gob.mx/snics/articulos/nopales-cultivo-emblematico-de-mexico?idiom=es>
- Seguel, M. (2020). *Hidrocoloides, Modificando la textura de los alimentos*. ALFA Group. <https://alfagroup.cl/hidrocoloides-modificando-la-textura-de-los-alimentos/#:~:text=La%20mayor%20parte%20de%20los,grasa%20o%20aceite%20y%20tipo.>
- Smith, B.C. (2018). Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203750841>
- Socrates, G. (2001). Infrared and Raman characteristic group frequencies: Tables and charts (3rd ed.). *John Wiley & Sons*.
- Sodini, I., Lucas, A., Tissier, J., Corrieu, G. (2005). Physical properties and microstructure of yoghurts supplemented with milk protein hydrolysates. *International Dairy Journal*, 15(1):29–35. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.05.006>
- Staffolo, M., Bertola, N., Martino, M., Bevilacqua, Y.A. (2004). Influence of dietary fiber addition on sensory and rheological properties of yogurt. *International Dairy Journal*, 14(3):263–268. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.004>
- Sun, J.X., Sun, X.F., Sun, R. C., Su, Y.Q. (2004). Fractional extraction and structural characterization of sugarcane bagasse hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*, 56(2):195–204. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.01.004>

- Tamime, A.Y., Robinson, R.K. (1999). *Yoghurt: Science and technology* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Tech, R.T.F. (2022). *Gomas y gelatinas, su uso en la industria alimentaria*. The Food Tech - Medio de Noticias Líder En la Industria de Alimentos y Bebidas. <https://thefoodtech.com/ingredientes-y-aditivos-alimentarios/gomas-y-gelatinas-su-uso-en-la-industria-alimentaria/>
- Thakur, B.R., Singh, R.K., Handa, A.K. (1997). Chemistry and uses of pectin—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37(1):47–73. <https://doi.org/10.1080/10408399709527767>
- Torres-Ponce, R.L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., Nevárez-Moorillón, G.V. (2015). *El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1129–1142. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263139893015.pdf>
- Torres-Sales, A. (2011). Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes (Experiencias de Brasil). *Revista Salud Pública y Nutrición*, Edición especial 5, 143-151.
- Tranquilino, R.E. (2012). *Elaboración de una bebida funcional tipo yogurt a partir de aceites vegetales, inulina y Saccharomyces boulardii* [Tesis de licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Vargas, G., Martínez, P., Velezmoro, C. (2016). Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. *Scientia Agropecuaria*. 7(spe):23-230. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.09>
- Vargas-Rodríguez, L., Figueroa, G.A., Méndez, C.H.H., Nieto, A.P., Vieyra, M.I.G., Núñez, J.R.R. (2016). Propiedades físicas del mucílago de nopal. *Acta Universitaria*, 26:8-11. <https://doi.org/10.15174/au.2016.839>
- Vargas-Solano, S.V., Rodríguez-González, F., Martínez-Velarde, R., Campos-Mendiola, R., Hurtado-Salgado, M.A., Muthuswamy, P.J. (2022). Chemical Composition of Pear Cactus Mucilage at Different Maturity Stages. *Agrociencia*, 56(6):685-700. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2726>
- Wang, H., Livingston, K.A., Fox, C.S., Meigs, J.B., Jacques, P.F. (2013). Yogurt consumption is associated with better diet quality and metabolic profile in American

- men and women. *Nutrition Research*, 33(1):18-26. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2012.11.009>
- Webb, D., Donovan, S.M., Meydani, S.N. (2014). The role of Yogurt in improving the quality of the American diet and meeting dietary guidelines. *Nutrition Reviews*, 72(3):180-189. <https://doi.org/10.1111/nure.12098>
- Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F., Wang, D. (2012). Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review. *Applied Energy*, 104:801–809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.019>
- Zamora-Vega, R., Montañez-Soto, J.L., Martínez-Flores, H.E., Flores-Magallón, R., Muñoz-Ruiz, C.V., Venegas-González, J., Ariza Ortega, T.J. (2012). Effect of incorporating prebiotics in coating materials for the microencapsulation of *Saccharomyces boulardii*. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(8):930-935. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.687364>
- Zavala, M.E. (2012). Optimización del proceso de extracción del mucílago de cinco especies de *Opuntia* (L.) Miller de Michoacán. [Tesis Maestría. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Zhang, B., Huang, Q., Lu, M., Cheng, Y., Wang, Y. (2019). Understanding the structure and functionality of pectin in food applications. *Food Research International*, 120:38–49. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.020>
- Zhang, W., Huang, G. (2024). Preparation, characteristics and antioxidant activity of mung bean peel polysaccharides. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73068-6>

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas.	
Título del trabajo	"Extracción, caracterización y modificación por acetilación del mucílago de <i>Opuntia atropes</i> y su aplicación en un yogurt bajo en grasa".	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Jaquelyn Alvarez Marínez	1584177x@umich.mx
Director	D.C. Héctor Eduardo Martínez Flores	hector.martinez.flores@umich.mx
Codirector	N/A	N/A
Coordinador del programa	Dra. Rosa Elvira Núñez Anita	mae.ciencias.biologicas@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Se utilizó como herramienta de apoyo para mejorar la organización y redacción técnica a partir de textos propios.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Se utilizó como apoyo para agilizar la lectura de literatura científica en inglés.
Traducción a otra lengua	No	N/A
Revisión y corrección de estilo	Sí	Se utilizó como apoyo para revisar gramática, ortografía y estilo.
Análisis de datos	No	N/A
Búsqueda y organización de información	Sí	Se utilizó como herramienta complementaria para identificar la literatura más relevante.
Formateo de las referencias bibliográficas	No	N/A
Generación de contenido multimedia	No	N/A
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Jaquelyn Alvarez Marínez
Lugar y fecha	19 de Febrero de 2026. Morelia, Mich.

Jaquelyn Alvarez Marínez

**EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODIFICACIÓN POR
ACETILACIÓN DEL MUCÍLAGO DE Opuntia atropes Y SU APLI...**

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::3117:558977096

74 páginas

Fecha de entrega

20 feb 2026, 10:27 a.m. GMT-6

21.015 palabras

123.897 caracteres

Fecha de descarga

20 feb 2026, 10:37 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODIFICACIÓN POR ACETILACIÓN DEL MUCÍLAGO DE Opuntia....pdf

Tamaño del archivo

1.2 MB

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 12%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.