



Facultad de Ciencias Químicas BUAP

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Químicas

Licenciatura en Químico Farmacobiólogo

Departamento de Bioquímica-alimentos

**Desarrollo y caracterización de una película
comestible combiotica a base de pitahaya roja
(*Hylocereus polyrhizus*), *Lactobacillus acidophilus* e
inulina**

Tesis para obtener el título de
Licenciado en Químico Farmacobiólogo

Presenta

p. QFB Diego de Jesús Espinosa Martinez

Director de Tesis

Dra. Carlos Enrique Ochoa Velasco

Co-directora de Tesis

Dr. Paola Hernández Carranza

H. Puebla de Z. a febrero de 2026



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



OFICIO C.Q./CT 001 RPCR/2026

OFICIO DE REGISTRO Y NOMBRAMIENTO DE COMISION REVISORA

Nombre del(la) estudiante: **Diego de Jesús Espinosa Martínez**

Matrícula: **201936194**

Nombre del director: **D.C. Carlos Enrique Ochoa Velasco**

Nombre del codirector o asesor: **D.C. Paola Hernández Carranza.**

Título de la Tesis:

**"Desarrollo y caracterización de una película comestible combiotica a base de pitahaya roja
(Hylocereus polyrhizus), Lactobacillus acidophilus e inulina"**

Comisión Revisora:

Presidente: D.C. Verónica Liliana Ramírez Falcón

Firma: _____

Secretario: D.C. Diana Milena Torres Cifuentes

Firma: _____

Vocal: D.C. Carolina Ramírez López

Firma: _____

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z., 20 de enero de 2026

Dr. Henoc Flores Segura

Director Facultad de Ciencias Químicas

c.c.p. Archivo





**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



OFICIO C.Q./CT 004 A/2026

Dr. Henoc Flores Segura
Director Facultad de Ciencias Químicas
Presente.

OFICIO DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS

Título de la Tesis:

Desarrollo y caracterización de una película comestible combiotica a base de pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), *Lactobacillus acidophilus* e inulina

Comisión Revisora:

Presidente: D.C. Verónica Liliana Ramírez Falcón	Firma: _____
Secretario: D.C. Diana Milena Torres Cifuentes	Firma: _____
Vocal: D.C. Carolina Ramírez López	Firma: _____

Los integrantes de la Comisión Revisora comunicamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de licenciatura de **Químico Farmacobiólogo** que presenta la estudiante **Diego de Jesús Espinosa Martínez**, bajo la dirección del **D.C. Carlos Enrique Ochoa Velasco** y codirección de **D.C. Paola Hernández Carranza** por lo que estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el estudiante presente su defensa y examen, con número de matrícula **201936194**.

Atentamente

Comisión revisora

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z., 30 de enero de 2026

c.c.p. Archivo



Facultad de Ciencias Químicas
Av. San Claudio No. 1 Edificio FCQ 9
Ciudad Universitaria Col. San
Manuel (222)2295500 ext. 7390

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera especial a mi director de tesis, el Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco, y a mi Codirectora, la Dra. Paola Hernández Carranza por la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, así como por su orientación, apoyo y disposición durante el desarrollo de este trabajo, así como por las observaciones y sugerencias que contribuyeron a mejorar la calidad de la investigación.

Asimismo, expreso mi gratitud al departamento de bioquímica en alimentos por la disposición de facilitar las instalaciones, el equipo y los recursos necesarios para la realización de los análisis experimentales. De igual manera, agradezco a mis compañeros tesisistas por el apoyo brindado y por el conocimiento transmitido durante el desarrollo experimental.

Agradezco también a la Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por la formación académica recibida y por brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco a mi familia y seres queridos por su apoyo, comprensión y motivación constante durante este proceso académico.

INDICE

1. RESUMEN.....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. ANTECEDENTES	4
2.1 Empaque en alimentos.....	4
2.1.1 Empaques plásticos	4
2.1.2 Empaques comestibles	6
2.2 Compuestos bioactivos promotores de la salud	9
2.2.1 Compuestos antioxidantes.....	11
2.2.2 Compuestos fenólicos	13
2.3 Pitahaya (<i>Hylocereus</i> spp.)	17
2.3.1 Pitahaya roja (<i>Hylocereus polyrhizus</i>).....	18
2.4 Probióticos	19
2.4.1 Beneficios atribuidos sobre patologías	20
2.4.2 Probióticos en la industria alimenticia	21
2.5 Bacterias ácido-lácticas.....	24
2.5.1. <i>Lactobacillus</i> spp.....	25
2.5.2 <i>Lactobacillus acidophilus</i>	25
2.6 Prebióticos	27
2.6.1 Inulina.....	32
2.7 Combióticos	34
4. JUSTIFICACIÓN	35
5. OBJETIVOS.....	36
5.1 OBJETIVO GENERAL	36
5.2 OBJETIVOS PARTICULARES	36
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
8. METODOLOGÍA.....	41
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
9.1 Propiedades fisicoquímicas	47
9.2 Propiedades mecánicas.....	49
9.3 Parámetros de color	53
9.4. Compuestos funcionales de películas comestibles durante el almacenamiento	54
9.5 Población de <i>L. acidophilus</i> en las películas fermentadas	56

9.6 Pruebas de capacidad antimicrobiana de las películas	58
9.7 Aplicación de película comestible EF8 en dulce de camote mexicano	61
10. CONCLUSIONES.....	67
11. RECOMENDACIONES	69
12. REFERENCIAS	71

1. RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar, caracterizar y aplicar una película comestible combiótica elaborada a partir de pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), *Lactobacillus acidophilus* e inulina, como alternativa a los empaques convencionales y como medio para incorporar compuestos funcionales en alimentos. El estudio se fundamentó en el aprovechamiento de recursos naturales con potencial bioactivo y en la integración de componentes probióticos y prebióticos para mejorar el perfil funcional de los productos alimenticios.

La metodología implicó la formulación de una base filmogénica a partir de polvo pulpa de pitahaya roja, inulina y cultivos de *Lactobacillus acidophilus*, seguida de un proceso de secado controlado para la obtención de las películas comestibles. Posteriormente, se realizaron análisis fisicoquímicos, mecánicos y de color, así como la determinación del contenido de compuestos funcionales durante el almacenamiento. Asimismo, se evaluó la viabilidad del probiótico incorporado, la capacidad antimicrobiana y su aplicación en un producto alimenticio, específicamente en dulce de camote mexicano.

Los resultados indicaron que las películas obtenidas presentaron propiedades estructurales, mecánicas y fisicoquímicas adecuadas para su uso como recubrimiento comestible, además de estabilidad en sus parámetros de color. Se observó una conservación significativa de los compuestos bioactivos y una viabilidad favorable de *Lactobacillus acidophilus* durante el periodo de almacenamiento. Adicionalmente, se evidenció actividad antimicrobiana y un efecto positivo en la conservación del alimento recubierto, manteniendo su calidad sensorial y microbiológica.

Se concluye que la película comestible combiótica desarrollada constituye una opción viable y funcional como empaque alternativo de alimentos, mejorando el perfil funcional de alimento al cual se le aplicó pudiendo aportar beneficios adicionales a la salud del consumidor. Asimismo, el material propuesto representa una opción prometedora para el desarrollo de sistemas de empaque innovadores y alimentos funcionales en la industria alimentaria.

2. INTRODUCCIÓN

En la industria alimenticia siempre ha sido de interés poder mantener los productos destinados para consumo humano en condiciones óptimas, esto para preservar sus características deseables y que su consumo satisfaga al cliente. Bajo esta premisa los empaques son un elemento indispensable para mantener protegido al alimento y aislado del medio externo, para lo cual la industria ha recurrido a empaques cada vez más sofisticados, tanto en su naturaleza según la materia prima con la que estén fabricados, como en las características y beneficios que ofrecen. Debido a su practicidad y costo, durante años han predominado los empaques plásticos, pues cumplen bien su función de protección y de evitar la contaminación del producto con elementos del exterior, sin embargo presentan desventajas importantes que pueden afectar al producto, y ni hablar del impacto ambiental cada vez más serio que el uso de empaques plásticos tiene, por tal motivo la industria se ha enfocado el desarrollo de diversos tipos de empaques, desde aquellos amigables con el medio ambiente hasta los empaques comestibles, que no solo cumplen con la función básica de protección del producto, si no que resultan bastante convenientes y versátiles, debido a que pueden ser fabricados con una variedad considerable de productos de origen natural, así como también la posibilidad de adicionar a dichos empaques comestibles componentes bioactivos que mejoren el valor nutricional del alimento y aporten beneficios adicionales a la salud. En dicho sentido la pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*) resulta una alternativa bastante prometedora pues además de presentar un buen valor nutricional, aporta compuestos como antioxidantes y vitamina C, entre otros, además de beneficios adicionales a la función intestinal y a la salud en general, lo que la han convertido en una fruta bastante apreciada en la industria en la actualidad. Tomando en cuenta lo anterior mencionado, el presente trabajo tiene por objetivo desarrollar y caracterizar una película comestible combiótica a base de pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), *Lactobacillus acidophilus* como probiótico e inulina como prebiótico.

3. ANTECEDENTES

2.1 Empaque en alimentos

De acuerdo con lo que mencionado por Vasile y Baican (2021) el empaque de los alimentos es un elemento muy importante pues busca mantener en buen estado el producto desde el momento de su producción hasta que es consumido, pero no se limita solo a proteger el producto de contaminantes, daño físico o de cambios ambientales, si no que tiene un papel importante en la preservación de la frescura y de su calidad en general, manteniendo las características que lo hacen deseable. Así mismo el empaque también cumple con la función de dar información básica del producto al consumidor, facilita su manipulación durante el transporte y almacenamiento y garantiza que el producto llegue en condiciones óptimas al consumidor final. Los avances más recientes en tecnología de empaques nos han permitido el desarrollo de materiales que resultan más resistentes y sostenibles, que no solo extienden la vida útil de los alimentos retardando su deterioro y degradación, sino que tambien responden a la creciente demanda en la búsqueda de alternativas más ecológicas. De tal manera que, el empaque cumple tanto un papel esencial en la cadena de suministro, asegurando la seguridad alimentaria y la satisfacción del consumidor, mientras que tambien se adapta a las tendencias actuales de sostenibilidad.

2.1.1 Empaques plásticos

Los empaques de plástico han cambiado la forma en que almacenamos y transportamos alimentos, pues se tienen como una solución práctica y económica. Sin embargo, según lo descrito por Pizzorno (2024), su uso también plantea preocupaciones relacionadas con la seguridad alimentaria pues cuando los alimentos entran en contacto con estos empaques, pueden llegar a estar expuestos a diversas sustancias, como plastificantes y contaminantes que pueden migrar desde el empaque hacia el alimento. A pesar de los controles de seguridad aplicados a los empaques plásticos, estos no son completamente inertes y pueden llegar a liberar cantidades variables de metales y compuestos químicos en los alimentos, un proceso que se ve incrementado cuando los envases son expuestos a altas temperaturas, como durante

el calentamiento en microondas o el almacenamiento prolongado a temperaturas elevadas.

2.1.1.1 Problemas ambientales

De acuerdo con lo que Ncube (2020) nos menciona, el empaque de alimentos es el sector de mayor crecimiento en el mercado de envases de plásticos, impulsado por cambios en los hábitos de consumo, como lo son el uso de envases duraderos para alimentos preparados y el uso de plásticos de un solo uso, los cuales, en particular resultan un problema debido a que su vida útil es muy corta, pero son de larga permanencia en el medio ambiente llegando a tardar cientos de años en descomponerse. Debido a la conveniencia que estos materiales ofrecen en lo que respecta a almacenamiento, transporte y conservación de alimentos y a medida que aumenta la producción y el consumo de alimentos envasados, la cantidad de residuos plásticos que se liberan en el medio ambiente también crece a un ritmo alarmante, contribuyendo a la contaminación de océanos, suelos y ecosistemas.

Según lo descrito por Celi-Simbaña (2023), se tiene estimado que la producción mundial de plásticos ha aumentado un 9% de manera anual desde los años 60 y que de dicha producción una media de 8 millones de toneladas se vierte al mar cada año, sin embargo esta cifra continua en aumento puesto que la demanda de empaques plásticos continúa creciendo a nivel mundial

2.1.1.2. Problemas para la salud

Basándonos en lo mencionado por Muncke (2021), el contacto directo entre los alimentos y los envases de plástico puede resultar en la transferencia de diversas sustancias químicas a los alimentos, lo que termina por introducir estos compuestos en la dieta humana. Entre estas sustancias, las más preocupantes que pueden migrar a los alimentos están los ftalatos, utilizados como plastificantes, y el bisfenol A (BPA), empleado en la fabricación de ciertos tipos de plásticos. Ambos han sido asociados con efectos adversos para la salud, como interrupciones en el sistema endocrino y un mayor riesgo de desarrollar ciertos tipos de cáncer. La presencia de estas sustancias, incluso en pequeñas cantidades es motivo de alarma ya que pueden acumularse en el organismo con el tiempo, aumentando el riesgo de efectos nocivos.

Asimismo el autor refiere que la transferencia de las sustancias químicas antes mencionadas desde los envases hacia los alimentos es un fenómeno que está científicamente comprobado y que la migración puede ocurrir debido a la composición química del plástico, la temperatura a la que se almacenan o calientan los alimentos, y el tiempo de contacto entre el envase y el alimento. Los plásticos no son totalmente inertes, lo que significa que pueden liberar compuestos químicos, algunos de los cuales no han sido completamente caracterizados o evaluados desde un punto de vista toxicológico.

2.1.1.3 Problemas asociados con el alimento

Basándonos en la investigación realizada por Vasile y Baican (2021) las interacciones y contacto entre los alimentos y sus envases pueden impactar negativamente tanto la calidad como la seguridad del producto final. Uno de los problemas más comunes es el cambio en el sabor de los alimentos, que puede ocurrir cuando estos se envasan en materiales poliméricos, como los plásticos. Este fenómeno puede manifestarse de dos maneras principales: la absorción de aromas del entorno y la transferencia de sabores indeseables desde el envase al alimento. La absorción de aromas ocurre cuando los compuestos volátiles del alimento se adhieren al material del envase, lo cual ocasiona que disminuya de la intensidad del sabor original del producto. Por otro lado, la transferencia de sabores indeseables sucede cuando los compuestos químicos presentes en el envase migran hacia el alimento, alterando su sabor y, en algunos casos, su olor. El autor nos da a entender que estos mecanismos de deterioro son particularmente problemáticos en los envases de plástico debido a la naturaleza permeable de algunos polímeros, que pueden permitir la migración de estos compuestos, afectando la experiencia sensorial del consumidor pudiendo reducir la aceptabilidad del producto y, en algunos casos, poner en riesgo su seguridad si los compuestos migratorios son tóxicos o si alteran el equilibrio químico del alimento.

2.1.2 Empaques comestibles

De acuerdo con lo mencionado por Petkoska, Daniloski y colaboradores (2021) podemos mencionar que los envases comestibles representan una alternativa

innovadora y sostenible en el ámbito del envasado activo de alimentos, destacándose por su capacidad para optimizar la calidad alimentaria en comparación con los envases convencionales. Estos envases no solo cumplen con la función básica de proteger los alimentos, actuando como una barrera protectora contra factores externos como la humedad y el oxígeno que pueden acelerar el deterioro de los productos, sino que también ofrecen ventajas adicionales además de prolongar su vida útil, como reducir el impacto ambiental generado por la industria del empaquetamiento, puesto que al ser comestibles y biodegradables, estos envases contribuyen a la reducción de residuos plásticos, un aspecto muy importante en la lucha contra la contaminación.

2.1.2.1 Películas y recubrimientos comestibles

Basándose en la información expuesta por Díaz-Montes y Castro-Muñoz su investigación de 2021 una película o recubrimiento comestible es un material delgado, de aproximadamente 0.3mm de espesor o menos, el cual se encuentra compuesto por biopolímeros y aditivos que se encuentran dispersos en un medio acuoso y que se someten a un proceso de deshidratación para formar una capa rígida y sólida. A pesar de que el termino película, film o recubrimiento comestible llegan a ser utilizados de manera indistinta, múltiples investigadores sostienen que existe diferencia entre ambos conceptos de acuerdo a la técnica de aplicación. En el caso del recubrimiento comestible este se forma de manera directa sobre la superficie del alimento a recubrir mediante su inmersión, pulverización o mediante brochado; por otro lado, la película comestible se elabora previamente como una lámina independiente para posteriormente ser adherida al producto. Por último, film comestible es un término general usado para referirse de manera indistinta tanto a un recubrimiento o una película comestible y no debe confundirse con el termino biofilm el cual de acuerdo con Sharma et al. (2023), se utiliza para referirse a comunidades complejas de microorganismos, principalmente bacterias, que se adhieren a superficies y se encuentran incrustadas en una matriz polimérica extracelular producida por ellos mismos.

A pesar de existir diferencias en la forma de elaboración ambos tipos forman una matriz rígida que presenta características estructurales similares, y tienen por objetivo

mejorar la conservación del alimento, actuando como una barrera frente a la humedad, el oxígeno y demás factores ambientales.

Asimismo de acuerdo con la investigación de los autores antes mencionados se encontró que el desarrollo de películas comestibles es uno de los campos más prometedores dentro de la ciencia de los alimentos. Estas películas pueden ser fabricadas a partir de una amplia variedad de materiales naturales, como proteínas, polisacáridos y lípidos, lo que las hace bastante versátiles. Además, también presentan la ventaja que pueden incorporar sustancias activas, como antioxidantes y agentes antimicrobianos, que no solo protegen a los alimentos de la degradación, sino que pueden mejorar sus propiedades nutricionales y sensoriales.

De acuerdo con el trabajo realizado por Debeaufort et.al. (1998) se nos menciona que las películas y recubrimientos comestibles son una alternativa bastante innovadora en lo que a la conservación de alimentos respecta puesto que presentan las siguientes propiedades:

- Protección contra la luz UV, lo cual reduce el impacto de la radiación y evita la degradación de ciertos compuestos fotosensibles, evitando así cambios en la coloración de los alimentos que podrían hacerlos menos llamativos.
- Transporte de solutos, como pueden ser sales, aditivos, pigmentos, compuestos funcionales, etc., que pueden mejorar ciertas propiedades sensoriales del alimento.
- Regulación del intercambio de sustancias, actuando como una barrera ante el paso del vapor de agua, vapores orgánicos que puedan causar modificaciones de olor y sabor de los productos, así como de gases como el oxígeno, dióxido de carbono, etileno, etc., lo que contribuye a mantener la frescura de los productos y retardar su maduración o degradación.
- Protección mecánica, logrando prevenir daños físicos a los productos ocasionados por abolladuras o cortes que puedan comprometer la calidad del alimento.
- Extensión de la vida útil, esto mediante la reducción de la exposición a factores ambientales que aceleran el deterioro.

- Incorporación de compuestos bioactivos, como son el caso de los antioxidantes, que ayudan a preservar la calidad y estabilidad del alimento además de aportar beneficios adicionales a la salud del consumidor.
- Efecto antimicrobiano, mediante la incorporación de compuestos que tengan efecto bactericida, que inhiben la proliferación de bacterias en el alimento y que puedan ayudar a controlar el desarrollo de bacterias patógenas en el organismo.
- Aporte de microorganismos benéficos, como es el caso de los probióticos, que puedan mejorar la salud del consumidor favoreciendo el equilibrio de la microbiota intestinal.
- Uso de materiales biodegradables y comestibles, lo que permite reducir el impacto ambiental y contribuir a la sostenibilidad.

2.2 Compuestos bioactivos promotores de la salud

“Los compuestos bioactivos de los alimentos son componentes extranutricionales que normalmente se encuentran en pequeñas cantidades en los alimentos. En resumen, numerosos compuestos bioactivos parecen tener efectos beneficiosos para la salud.” (Teodoro, 2019)

En la revisión realizada por Konstantinidi et al. (2019) se describe que los compuestos bioactivos se encuentran presentes en pequeñas cantidades en los alimentos y son sustancias que tienen efectos positivos sobre la salud humana más allá de su valor nutricional básico. Aunque estos no son esenciales para la vida, su consumo regular puede desempeñar un papel clave en la prevención de diversas enfermedades crónicas. Esto ha sido sustentado por diversas Investigaciones epidemiológicas que han demostrado que una dieta rica en alimentos funcionales naturales, como frutas, verduras, legumbres, cereales integrales, y algunas especias, está directamente relacionado con la reducción del riesgo de enfermedades crónico-degenerativas, como son la hipertensión arterial, el cáncer, el síndrome metabólico, la diabetes tipo II y la obesidad. Entre los compuestos bioactivos más estudiados se encuentran los polifenoles, carotenoides, flavonoides, fitoesteroles y glucosinolatos, todos ellos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y moduladoras del

metabolismo. También han sido vinculados con la reducción del riesgo de ciertos tipos de cáncer. El interés en estos compuestos ha impulsado investigaciones para entender mejor su papel en la modulación de los procesos metabólicos y celulares, lo que podría llevar al desarrollo de nuevas estrategias preventivas y terapéuticas para las enfermedades mencionadas.

Un desafío importante para la industria alimenticia según lo mencionado por Kurek et al. (2022), es la estabilidad de los componentes bioactivos, ya que a pesar de sus múltiples beneficios para el consumidor, son sumamente sensibles ante condiciones como el calor, la luz, humedad y el pH, lo que compromete su efectividad además de que si no se almacenan de manera adecuada en algunos casos pueden causar alteraciones en las propiedades sensoriales consideradas deseables en los productos alimenticios, pudiendo cambiar color, olor y sabor de los productos, causando un impacto negativo en la aceptación general. Por esta razón, para garantizar el efectivo funcionamiento de los compuestos bioactivos a lo largo de la vida útil del alimento, desde su fabricación y almacenamiento, hasta el consumo, ingestión y absorción durante el proceso digestivo. Para poder superar estos inconvenientes la industria ha recurrido a diversas estrategias tecnológicas para preservar en óptimas condiciones los compuestos bioactivos, entre las que se encuentran:

- Microencapsulación: Técnica en la que el compuesto bioactivo es envuelto en una matriz que actúa como barrera física frente a las condiciones del medio externo, siendo carbohidratos, proteínas y lípidos los materiales más comunes utilizados como recubrimiento, permitiendo también una liberación dirigida específicamente en el tracto gastrointestinal.
- Agentes estabilizantes: Compuestos emulsionantes o estabilizadores pueden ser añadidos para evitar la oxidación o reacciones químicas no deseadas, contribuyendo a la estabilización del compuesto bioactivo.
- Nanoencapsulación: Técnica que implica la incorporación del compuesto bioactivo en nanopartículas o liposomas, que ofrecen una mejor protección y permiten una liberación más controlada en las áreas específicas del organismo donde ejercen su efecto, y aumentando su biodisponibilidad.

- Modificación química: Alteración molecular del compuesto bioactivo, lo que puede aumentar su resistencia ante los factores ambientales sin comprometer su funcionalidad.
- Envases inteligentes: Materiales de envasado que protejan al compuesto contra la luz, el oxígeno o la humedad, lo que es clave para extender la vida útil del producto y preservar la bioactividad de los compuestos funcionales.

2.2.1 Compuestos antioxidantes

De acuerdo con la revisión realizada por Carson et al. (2022), los compuestos antioxidantes son moléculas que llevan a cabo un papel sumamente importante en la protección del organismo contra el daño ocasionado por el estrés oxidativo, el cual es resultante del desequilibrio entre los radicales libres y las defensas antioxidantes. De acuerdo con la investigación estos compuestos actúan neutralizando a los radicales libres, los cuales resultan ser altamente reactivos, evitando así que dañen estructuras celulares importantes, como las membranas lipídicas, proteínas o el mismo ADN. La principal acción de los compuestos antioxidantes radica en interrumpir la serie de reacciones desencadenadas por las especies reactivas de oxígeno, las cuales pueden propagar el daño antes mencionado por diferentes sistemas del organismo si no se controlan.

Los autores también comentan que los compuestos antioxidantes pueden actuar por medio de diferentes mecanismos, entre los que se nos mencionan:

1. Eliminación directa de agentes oxidantes: Se encargan de neutralizar oxidantes reactivos antes de que estos puedan causar daño celular.
2. Conversión de radicales tóxicos: Se encargan de convertir radicales libres dañinos en moléculas con menor capacidad oxidativa.
3. Incremento de las defensas endógenas: Potenciación de los sistemas antioxidantes propios del organismo, como aquellos que dependen de la acción de enzimas para la neutralización de especies reactivas de oxígeno.
4. Prevención de radicales libres: Se busca reducir la producción de estos compuestos mediante mitigar los factores que desencadenan su formación en el organismo.

Es mediante el control de estos procesos que los compuestos antioxidantes limitan los efectos nocivos que conlleva el estrés oxidativo, tales como enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, cáncer e incluso el envejecimiento prematuro.

Por otro lado Weiss y Landauer (2003) comentan que los compuestos antioxidantes se pueden clasificar en compuestos de origen natural y sintético; teniendo en los naturales a aquellos compuestos de carácter endógeno, que son producidos en el mismo organismo, y exógeno, que provienen de fuentes externas.

Entre los antioxidantes endógenos se encuentran aquellos que son de carácter enzimático y no enzimático. Los enzimáticos defienden al organismo de manera bastante eficiente contra el daño oxidativo pues tienen la capacidad de descomponer a las especies reactivas de oxígeno, entre estos podemos encontrar a las enzimas superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa, que son la principal línea de defensa del organismo contra el estrés oxidativo, mientras que los compuestos no enzimáticos juegan un papel secundario.

Por otro lado, Carsono et al. (2022) mencionan que los antioxidantes exógenos de origen natural se encuentran principalmente en plantas y alimentos de origen vegetal, existiendo una gran cantidad de compuestos antioxidantes producidos por los organismos vegetales aunque por cuestiones de seguridad solo algunos son seguros para consumo, además de que algunos de estos por sus características químicas y físicas tienen la capacidad de alterar las propiedades sensoriales de los productos alimentarios, como es mencionado por Taghvaei et al. (2015). Entre los antioxidantes de origen vegetal más comunes encontramos a los ácidos fenólicos, los carotenoides, estilbenos, cumarinas, líganos, compuestos organosulfurados, vitaminas y flavonoides, y entre los de origen mineral se nos es mencionado el selenio, zinc y manganeso.

Por último, sobre los antioxidantes sintéticos Moharram y Youssef (2014) mencionan que estos están diseñados para interactuar con las especies reactivas de oxígeno mediante diversos mecanismos con el fin de complementar o reforzar la defensa conferida por los antioxidantes endógenos. Entre los mecanismos utilizados encontramos a la unión con iones metálicos, teniendo una acción quelante sobre

metales de transición como el caso del hierro y el cobre, metales clave para la síntesis de radicales libres, desactivación de oxígeno singlete, el cual es el estado más excitado del oxígeno y llevándolo a su forma menos reactiva, conversión de especies radicales a no radicales mediante la donación de electrones o hidrógenos a las especies reactivas de oxígeno, dando lugar así a especies estables, y mediante la absorción de radiación UV, evitando la formación de especies reactivas de oxígeno en los tejidos expuestos.

2.2.2 Compuestos fenólicos

De acuerdo con lo señalado por Lin et al. (2016), menciona que los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios bastante importantes producidos por las plantas, los cuales se derivan de la ruta metabólica del ácido shikímico y de las pentosas fosfato mediante la biosíntesis de fenilpropanoides. En cuanto a su estructura química estos compuestos se caracterizan por la presencia de anillos de benceno con uno o más grupos hidroxilo, lo cual les confiere diversas funciones biológicas, en las plantas estos son fundamentales como defensa ante patógenos, protección frente a la radiación UV y como atractor para polinizadores, además de destacar sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y beneficioso adicionales en enfermedades crónico-degenerativas. En cuanto a su clasificación la más usual es su subdivisión en compuestos no flavonoides, como los ácidos fenólicos, y compuestos flavonoides.

2.2.2.1 Ácidos fenólicos

Kiokias et al. (2020) reportan que los ácidos fenólicos son un grupo de compuestos bioactivos que están presentes en diversas plantas, pero sobre todo en hierbas aromáticas como el tomillo, orégano, romero, salvia y menta. Sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias han sido ampliamente estudiadas y se les atribuye un papel importante en la protección celular contra el estrés oxidativo; en las plantas estos actúan como barreras químicas que les proporcionan protección ante el consumo por parte de animales, patógenos y contra condiciones ambientales adversas, mientras que su consumo en la dieta humana mediante infusiones, especias y extractos actúan como agentes naturales coadyuvantes en la prevención de diversas enfermedades

crónicas. Entre los ácidos fenólicos más comunes se encuentran el ácido cafeico, ácido ferúlico y el ácido p-cumárico, donde su mecanismo de acción se basa en la neutralización de radicales libres, en modular las rutas inflamatorias y protección frente al daño oxidativo en las células y tejidos.

Respecto a su clasificación el autor menciona que los ácidos fenólicos se subdividen en 3 grupos de acuerdo con su estructura química:

- Ácidos hidroxibenzoicos con estructura C_6-C_1 , los cuales han sido asociados a la actividad antioxidante presente en las infusiones herbales así como compuestos saborizantes.
- Ácidos hidroxicinámicos con estructura C_6-C_3 , encontrados principalmente en especias y también en hierbas aromáticas.
- Ácidos fenilacéticos con estructura C_6-C_2 , son el tipo de ácidos fenólicos menos comunes, encontrándose en cantidades muy reducidas solo en algunas frutas y vegetales.

2.2.2.2 Flavonoides

Los flavonoides, han sido reportados por De Luna et al. (2020), como metabolitos secundarios que presentan una distribución y variedad bastante amplia dentro del reino vegetal, siendo conocidos por su diversidad estructural y funcional. Este tipo de compuestos se pueden encontrar en altas concentraciones en frutas, vegetales, semillas, flores y hojas, siendo los principales compuestos responsables de características como el color, olor y sabor, así como de cumplir roles esenciales para la supervivencia de las plantas como para su interacción con el entorno.

Entre las funciones que los flavonoides cumplen en las plantas se nos mencionan la regulación del crecimiento celular, modulando los procesos de desarrollo, contribuyendo al crecimiento equilibrado de las plantas, como atractor de polinizadores, puesto que son responsables del color y el aroma de muchas flores, los flavonoides contribuyen a la atracción de insectos polinizadores, lo que promueve la reproducción vegetal. Así mismo confiere protección contra el estrés biótico, siendo medio de defensa frente a patógenos, inhibiendo el crecimiento de microorganismos; también confieren protección frente al estrés abiótico, absorbiendo la radiación UV

protegiendo las células vegetales, depurando especies reactivas de oxígeno, puesto que presentan efecto antioxidante, y por ultimo confieren tolerancia ante condiciones extremas, dándole la posibilidad a las plantas de adaptarse a climas adversos, ayudándolas a soportar sequías, olas de calor o bajas temperaturas. De acuerdo con lo mencionado por los autores este

tipo de compuestos no solo contribuyen a las características sensoriales de los productos vegetales que consumimos si no que tienen un rol importante en la supervivencia y adaptabilidad de las plantas al entorno que las rodea.

En cuanto a su estructura química D'Amelia et al. (2018) comenta que en su gran mayoría los flavonoides presentan una estructura C₆-C₃-C₆, conteniendo dos anillos de benceno (A y B), conectados por un anillo de pireno heterocíclico (C) que contiene oxígeno, como se muestra en la Figura 1, y la clasificación de los flavonoides depende de a que carbono en el anillo C este enlazado el anillo B.

De acuerdo con Panche et al. (2016) la subdivisión de los flavonoides es la siguiente:

- Flavonas: En su mayoría estos compuestos presentan un doble enlace entre las posiciones 2 y 3 y un grupo cetónico en la posición 4 del anillo C, así como un grupo hidroxilo en la posición 5 del anillo A; se trata de un compuesto que está presente de manera importante en el apio, perejil, pimientos, manzanilla, menta y ginkgo biloba.
- Flavonoles: En cuanto a su estructura básica estos compuestos presentan un grupo cetónico en la posición 4 del anillo C y suelen estar hidroxilados en la posición 3 de este mismo anillo; se encuentran de manera abundante en alimentos como cebolla, col rizada, lechuga, tomate, manzana, uvas, bayas, así como en té y vino tinto.
- Flavanonas: Este tipo de compuestos se encuentra presente en la mayoría de los cítricos, tales como el limón y la naranja, así como en las uvas, y son

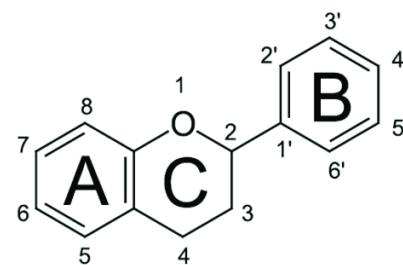


Figura 1. Estructura básica de los flavonoides

responsables del sabor amargo de la cascara de estos alimentos, tambien se les conoce como dihidroflavonas y en cuanto a su estructura presentan un anillo C saturado, por lo que el doble enlace entre las posiciones 2 y 3 presente en la mayoría de los flavonoides no se encuentra en estos compuestos.

- Isoflavonas: Este tipo de compuestos tiene una distribución bastante limitada en el reino vegetal y únicamente se encuentra en los granos de soja y en plantas leguminosas; en cuanto a su estructura estos carecen de hidroxilación en el anillo C y el anillo B se encuentra enlazado a la posición 3 del anillo C.
- Antocianinas: Son compuestos responsables de la coloración en plantas, flores y frutos, se pueden encontrar de manera abundante en frutas como arándanos, uvas, fresa, frambuesa, y diferentes tipos de moras; la coloración que estos presentan depende tanto del pH del medio como de la metilación y acilación en los grupos hidroxilo de los anillos A y B.
- Chalconas: Se les considera como flavonoides de cadena abierta puesto que carecen del anillo C de la estructura básica. Se pueden encontrar de manera importante en tomates, peras, fresas y bayas.

En lo que respecta a sus propiedades funcionales, de acuerdo con Dias et al. (2021) hay evidencia que muestra que el consumo de flavonoides induce numerosos beneficios a la salud y que el consumo de una dieta rica en este tipo de compuestos puede ayudar a la prevención de enfermedades crónico-degenerativas.

Flavonoides como los flavonoles, flavonas, isoflavonas y antocianinas juegan un papel importante en las reacciones inflamatorias actuando como agentes antiinflamatorios pues neutralizan especies reactivas de oxígeno y reducen la acumulación de especies reactivas de oxígeno, inhiben la actividad de enzimas regulatorias y la transcripción de factores involucrados en la progresión de los procesos inflamatorios, así como siendo moduladores de la actividad de células del sistema inmune. Asimismo las propiedades antiinflamatorias de los flavonoides tienen relevancia en el desarrollo de procesos cancerígenos mediante su inhibición, inducción del proceso de apoptosis, frenando el ciclo celular e inhibiendo el proceso de angiogénesis, además de inhibir la proliferación de células tumorales mediante la

supresión de las enzimas xantina oxidasa, ciclooxigenasa-2 y 5-lipoxigenasa, implicadas en la promoción y desarrollo de tumores.

Los flavonoides también ejercen una función cardioprotectora evitando la oxidación de lipoproteínas de baja densidad, reduciendo la agregación plaquetaria, induciendo la vasodilatación y relajando el tejido muscular liso del sistema vascular, lo que contribuye a reducir la presión, así como también actúan como regulador del proceso de apoptosis en el endotelio vascular.

En cuanto a su actividad contra patógenos los flavonoides tienen efecto bactericida mediante su interferencia con la bicapa lipídica, haciéndola más permeable y afectando su integridad, provocando su ruptura, evitando la formación de biofilms, la síntesis de ácidos nucleicos, interviniendo con la cadena transportadora de electrones y la síntesis de ATP. Asimismo los flavonoides tienen efecto antifúngico puesto que también afectan la integridad de la membrana celular, pero además provocan disfunción mitocondrial, inhiben la formación de la pared celular, la síntesis de ARN y síntesis de proteínas. Por último, existe evidencia de que los flavonoides pueden intervenir en procesos virales importantes, lo que resulta en un efecto antiviral, pueden bloquear el anclaje y penetración de los virus al interior de las células, interfieren en su replicación y previenen que estos sean liberados.

2.3 Pitahaya (*Hylocereus* spp.)

La pitahaya, también conocida como fruta del dragón, de acuerdo con lo mencionado por Shah et al. (2023), es un fruto del género *Hylocereus* spp. que pertenece a la familia *Hylocereus* que presenta múltiples beneficios y usos que van más allá de su atractivo visual y sabor exótico. Además de ser rica en antioxidantes, vitamina C, calcio y hierro, es una excelente fuente de fibra que contribuye a mejorar la digestión. En el campo de la medicina, se le han atribuido propiedades antiinflamatorias y antioxidantes que ayudan a fortalecer el sistema inmunológico y a prevenir enfermedades crónicas; su popularidad también ha crecido gracias a su versatilidad culinaria, pues se consume fresca, en jugos, mermeladas, batidos o incluso en ensaladas, haciendo de la pitahaya un producto de alto consumo y relevancia económica en muchas regiones tropicales y subtropicales. En cuanto a sus aplicaciones industriales, los pigmentos naturales

presentes en la pulpa se utilizan como colorantes naturales en la industria alimentaria y cosmética.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la Pitahaya (*Hylocereus* spp.)

Nivel organizacional	
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophita</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Caryophyllale</i>
Familia	<i>Cactaceae – cactácea</i>
Tribu	<i>Hylocereeae</i>
Género	<i>Hylocereus</i>
Especies	<i>H. extensus, H. setaceus, H. tricae, H. minutiflorus, H. megalanthus, H. stenopterus, H. calcaratus, H. undatus, H. escuintlensis, H. ocamponis, H. guatemalensis, H. purpusii, H. costaricensis, H. trigonus, H. triangularis, H. monacanthus.</i>

Fuente: (Verona et al., 2020).

2.3.1 Pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*)

De acuerdo con lo reportado por Huda et al. (2021) la pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), originaria de México, se ha convertido como una de las frutas más apreciadas a nivel mundial no solo por su apariencia llamativa, sino por sus propiedades nutricionales. Su intenso color rojo púrpura se debe a la presencia de betacianinas, pigmentos con potentes efectos antioxidantes que ayudan a combatir los radicales libres y a proteger las células del daño oxidativo, asimismo es una excelente fuente de vitamina C y tiene un alto contenido de fibra, lo que la convierte en una aliada para la digestión. Su carácter exótico y sus beneficios para la salud han hecho que la pitahaya roja gane popularidad en mercados internacionales y que su demanda crezca en la industria de alimentos.

2.4 Probióticos

De acuerdo con lo reportado por Latif et al. (2023), el término probiótico fue introducido por Werner Kollath en 1953, y quien los definía como “cuerpos activos con funciones esenciales para promover aspectos de la salud”, lo cual no dista mucho de cómo están catalogados actualmente pues se pueden definir como microorganismos no patógenos que cuando son administrados en cantidades adecuadas pueden aportar ciertos beneficios a quien los consume al ejercer diversas acciones en el tracto gastrointestinal que dan lugar a compuestos beneficios para la salud. En lo que respecta a la industria de alimentos estos microorganismos se han convertido en el componente prominente y principal en la formulación de gran cantidad de alimentos funcionales, siendo considerados como microorganismos potencialmente probióticos a cepas de los géneros *Pediococcus* spp., *Lactococcus* spp., *Enterococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Propionibacterium* spp., y *Bacillus* spp. Asimismo nos mencionan que las cepas más frecuentemente usadas en las formulaciones de alimentos funcionales pertenecen a los géneros *Bifidobacterium* spp. y *Lactobacillus* spp, esto debido a que se le atribuyen beneficios a la salud en los que se incluyen la eliminación de xenobióticos provenientes de contaminantes ambientales, la capacidad de biotransformar micotoxinas, sintetizar componentes beneficios como la riboflavina, vitamina K y folatos, así como fermentar la fibra no digerible en el intestino, además de prevenir el desarrollo de bacterias patógenas mediante la restricción de sitios de anclaje en la mucosa del epitelio intestinal y modulando la respuesta inmunológica del hospedero.

Por otro lado Fenster et al. (2019) mencionan que los productos alimenticios en los que más comúnmente son incorporados los probióticos son en bebidas, helados, pan, así como en alimentos fermentados como el yogurt o algunos tipos de alimentos en conserva y que el consumo aproximado de 10^9 UFC/día está considerado como una dosis adecuada.

De acuerdo con lo presentado por Latif et al. (2023) el mayor desafío que existe cuando se trata del uso de probióticos en la industria alimenticia está relacionado con la sensibilidad de los microorganismos al procesamiento de los alimentos, al proceso

y condiciones de almacenamiento así como como su resistencia al estrés gastrointestinal, por lo que en años recientes la industria ha enfocado sus esfuerzos en desarrollar métodos que aumenten la resistencia de los probióticos para aumentar su tasa de supervivencia, esto mediante su microencapsulación o también mediante la modificación genética para hacerlos más resistentes a diversas condiciones adversas.

En cuanto a su mecanismo de acción Plaza-Díaz et al. (2019) mencionan que a pesar de que existen grandes avances en la investigación de las propiedades asociadas a los probióticos, su mecanismo de acción aun no es completamente claro, sin embargo se sabe que sus efectos beneficios están relacionados a mecanismos de acción como son la exclusión competitiva de bacterias patógenas, pues estos compiten en el tracto gastrointestinal tanto por nutrientes como por sitios de anclaje en el epitelio intestinal, lo que dificulta que microorganismos patógenos puedan prevalecer en el intestino, más aun considerando que los probióticos también tienden a actuar como agentes antimicrobianos debido a la producción de compuestos que presentan acción bactericida, como lo son ácidos orgánicos y peróxido de hidrógeno por nombrar algunos. Además los probióticos favorecen la integridad de la barrera intestinal puesto que estimulan la producción de mucinas y regulando la expresión de proteínas TJ.

Respecto a la regulación de la respuesta inmune Petruzzello et al. (2023) mencionan que los probióticos influyen de manera importante tanto en la regulación de la respuesta innata como en la adaptativa, incrementan la producción de citocinas antiinflamatorias, así como interactúan con las células del epitelio intestinal favoreciendo la atracción de células de la respuesta inmune innata, como los macrófagos, células dendríticas y células mononucleares como linfocitos T y B.

2.4.1 Beneficios atribuidos sobre patologías

De acuerdo con lo mencionado por Liang et al. (2022), los probióticos tienen influencia sobre la modulación de las reacciones alérgicas mediante dos mecanismos propuestos, ambos asociados a la mejorar de la integridad de la barrera gastrointestinal, siendo el primero netamente mecánico, evitando el traspaso de antígenos alérgicos a través de la barrera, por otro lado el segundo se centra en la

modulación de la respuesta inmune mediante el favorecimiento de la expresión de linfocitos T reguladores, que nivelan el balance entre la expresión de LTh1 y LTh2, siendo estos últimos los predominantes en la enfermedad alérgica y los cuales, mediante la expresión de IL-4, 5 y 6, reclutan de manera desmedida a células granulocíticas, dando paso a una respuesta inmune exacerbada que da lugar a la reacción de hipersensibilidad; favoreciendo el balance entre células Th1 y Th2, esta respuesta se ve regulada, además de que las células Th1 expresan interleucinas anti alérgicas.

Asimismo Samanta refiere en 2022, que los probióticos pueden actuar como un posible coadyuvante contra diferentes tipos de cáncer, especialmente contra aquellos que afectan al sistema digestivo y al hígado, mediante diferentes mecanismos propuestos, como son la reducción de producción de sales biliares carcinogénicas, inhibición de la carcinogénesis mediante la exclusión competitiva de patógenos en el intestino, favorecer el proceso de apoptosis en células cancerígenas así como una reducción de los factores angiogénicos en el caso del carcinoma hepatocelular. Además, se ha encontrado evidencia que el efecto anti carcinogénico ejercido por los metabolitos secundarios producidos por los probióticos no solamente actúa de manera local, si no también sistémica.

Thakkar et al. (2016) mencionan respecto al efecto de los probióticos en la hipercolesterolemia, que estos son una herramienta efectiva para reducir los niveles de colesterol en la sangre mediante la reducción de la absorción intestinal del colesterol así como mediante la deconjugación de las sales biliares, las cuales una vez deconjugadas su tasa de reabsorción en el intestino se ve reducida, favoreciendo así la excreción de estas sales biliares a través de las heces.

2.4.2 Probióticos en la industria alimenticia

Actualmente y gracias a que cada vez hay más información respecto a los beneficios que el consumo de probióticos tiene para la salud la industria de los alimentos se ha enfocado en buscar implementar probióticos en la formulación de cada vez más alimentos, así como en la búsqueda de nuevas estrategias para contrarrestar la sensibilidad que presentan los probióticos tanto a los tratamientos térmicos durante

el procesamiento de alimentos como al estrés al que se ven sometidos en el tracto gastrointestinal.

2.4.2.1 Probióticos en la industria láctea

En el caso de la industria de los lácteos de Souza Motta et al. (2019) refiere que hoy en día existe un gran interés por incluir probióticos en la formulación de los diferentes productos lácteos que se ofertan en el mercado, no solo por los beneficios anteriormente mencionados para la salud del consumidor, si no que tambien se ha demostrado que la adición de estos a la formulación de productos lácteos favorece al alargamiento de su vida de anaquel, puesto que las bacterias ácido lácticas probióticas actúan como agentes antimicrobianos. Entre los productos lácteos que actualmente se comercian como productos lácteos probióticos se encuentra la leche pasteurizada, helado, yogurt, queso y leche fermentada, siendo estos últimos dos considerados como un vehículo ideal para los microorganismos probióticos pues les confieren mayor protección en el tracto gastrointestinal por su capacidad de actuar como buffer por su pH y por su contenido de grasa.

2.4.2.2 Probióticos en la industria de bebidas

En contraparte, la industria de las bebidas tambien ha centrado su atención en buscar alternativas para los consumidores que buscan consumir probióticos en productos libres de lácteos ya sea por preferencia personal o por intolerancia a la lactosa, y de acuerdo con lo reportado por Mantzourani et. al (2018) actualmente ya existen diversas alternativas de bebidas que incorporan probióticos a su formulación, principalmente en la presentación de jugos de frutas, aunque tambien se han desarrollado bebidas funcionales a base de extracto de soja o jugo de coco fermentado, encontrándose en ambos casos que compuestos funcionales como polifenoles y antioxidantes, micronutrientes como calcio y potasio y el contenido de vitaminas se había visto incrementado posterior a la fermentación, esto según lo reportado por Laali et al (2018). Sin embargo de acuerdo con lo mencionado por Min et al. (2022) la industria de la bebida se ha encontrado con la dificultad de que la viabilidad de los probióticos en bebidas carentes de lácteos se ve reducida de manera importante debido a las condiciones a las que los probióticos se ven expuestos en la

bebidas, por esta razón Afzaal et al. (2022) menciona que una de las alternativas a las que la industria ha recurrido para asegurar la viabilidad de probióticos adicionados a bebidas es mediante la micro y nanoencapsulación. Sin embargo, y en contraparte el trabajo realizado por Miranda et. al en 2019 sugiere que la micro y nanoencapsulación de probióticos para su adición en bebidas no siempre es un método viable para todas las bebidas, puesto que, aunque es cierto que su viabilidad se ve incrementada, las técnicas de microencapsulación empleadas pueden llegar a afectar las propiedades sensoriales del producto, reduciendo así su aceptación por parte del consumidor, debido a este hecho y de acuerdo con Fenster et al. (2019), la industria de bebidas ha recurrido también a la suplementación de probióticos a través del empaque secundario, donde los probióticos se encuentran en compartimientos separados, aislados de la bebida y se incorporan antes de ser consumidos, como por ejemplo encapsulados en la taparrosca o en pajillas.

2.4.2.3 Probióticos en la industria de la panificación

Por otro lado, de acuerdo con el trabajo de Ganguly et al. (2019), en la industria de la panificación la investigación se ha centrado en la forma ideal de poder incorporar probióticos en las diferentes presentaciones de pan, galletas, etc., tratando de sobreponerse al claro obstáculo que se presenta en el caso de la panificación, el proceso térmico al cual son sometidos los productos durante la cocción, para lo cual se ha recurrido al estudio de la microencapsulación y el uso de masa fermentada como posibles métodos para incrementar el valor nutricional de los productos panificables como para incrementar la tasa de viabilidad celular durante el proceso de horneado. Además de acuerdo con lo reportado por Zhang et al. (2018), se encontró que la microencapsulación de probióticos en matrices como leche desnatada reconstituida, goma arábica, maltodextrina e inulina son alternativas para aumentar la viabilidad celular de los probióticos durante el proceso de horneado, siendo las más efectivas las primeras dos mencionadas.

2.4.2.4 Probióticos en empaques comestibles

Por último el acercamiento más reciente de la industria alimenticia para la incorporación de probióticos en productos alimenticios es mediante empaques

comestibles, lo que resulta en una técnica de encapsulación bastante conveniente puesto que su encapsulación no solo resulta en el aumento de la viabilidad y estabilidad de los probióticos durante el almacenamiento, si no que también aumenta su viabilidad en el tracto gastrointestinal, y a la vez aumenta la estabilidad y seguridad alimentaria de los productos alimenticios a los cuales se les aplique el empaque comestible suplementado con probióticos, esto de acuerdo con Pavli et al. (2018). Por tal motivo un gran número de investigadores han mostrado interés en la investigación y desarrollo de nuevos materiales como matrices para la encapsulación de probióticos, como es mencionado por Pop et al. en 2019, siendo los más estudiados derivados de la celulosa, zeína de maíz, extractos de algas, pectinas, alginatos. Por otro lado Ebrahimi et al. nos mencionan en el trabajo realizado en 2018 que las cepas de probióticos sobre las que se ha llevado a cabo mayor investigación son pertenecientes a las especies *L. acidophilus*, *L. casei*, *L. rhamnosus*, y *B. bifidum*, donde los resultados mostraron que las cepas de *L. acidophilus* son las que presentaron una mayor viabilidad durante el almacenamiento.

2.5 Bacterias ácido-lácticas

Las bacterias ácido-lácticas (BAL), como menciona Teneva-Angelova et al. (2018), son un grupo de microorganismos con una amplia presencia en múltiples entornos naturales, como plantas, la mucosa intestinal de los mamíferos y alimentos fermentados; estas bacterias juegan un papel crucial en los procesos de fermentación, ya que convierten los azúcares en ácido láctico, lo que contribuye a mejorar la conservación de los alimentos, asimismo son altamente valoradas por sus propiedades probióticas, siendo capaces de promover la salud intestinal y mejorar el equilibrio de la microbiota. Entre sus beneficios se incluyen la mejora de la digestión, el fortalecimiento del sistema inmunológico y la protección contra patógenos gastrointestinales. Además, algunas cepas han mostrado potencial en la prevención de enfermedades metabólicas y la reducción de inflamación crónica; es por ello que su uso en la industria alimentaria ha crecido exponencialmente y actualmente la demanda por nuevas cepas con propiedades específicas ha impulsado la investigación en el aislamiento de BAL, con el objetivo de mejorar las formulaciones de alimentos funcionales.

De acuerdo con lo mencionado por Parra en 2010 las bacterias ácido-lácticas se dividen en dos grupos según su capacidad de fermentar la lactosa: las homofermentativas, dónde se incluyen los géneros *Lactococcus* spp., *Pediococcus* spp., *Enterococcus* spp. y *Streptococcus* spp., las cuales producen dos moléculas de ácido láctico como principal producto de la fermentación; y las heterofermentativas que transforman una molécula de glucosa en un mol de ácido láctico, uno de etanol y uno de CO₂, generando solo un mol de ATP por glucosa y donde se incluyen los géneros *Lactococcus* spp., *Lactobacillus* spp., *Enterococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Leuconostoc* spp. y *Pediococcus* spp.

Según la revisión realizada por Abdul et al. (2023) las bacterias ácido-lácticas pertenecientes a los géneros *Lactobacillus* spp. y *Enterococcus* spp. son actualmente los probióticos más reconocidos. Entre las cepas de bacterias ácido-lácticas más comunes se encuentran *L. acidophilus*, *L. fermentum*, *L. casei*, *L. reuteri*, *L. rhamnosus*, *L. helveticus*, *L. lactis*, *L. crispatus*, *L. gasseri*, *L. plantarum* y *E. faecalis*.

2.5.1. *Lactobacillus* spp.

“El género *Lactobacillus* pertenece a la familia *Lactobacillaceae*, son mesófilos, no formadoras de esporas, en forma de bastón, inmóviles, Gram positivas y anaerobias facultativas, catalasa negativas” (Feiner, 2006).

El género *Lactobacillus*, de acuerdo con lo descrito por Samaniego & Sosa del Castillo (2006), prospera en medios ligeramente ácidos, con un rango de pH de 6.4 a 4.5, siendo el óptimo entre 5.5 y 6.2. Su crecimiento se detiene cuando el pH desciende a valores entre 3.6 y 4, dependiendo de la especie, y se reduce considerablemente en medios neutros o alcalinos. Además, *Lactobacillus* spp. tiene la capacidad de acidificar el sustrato donde se desarrolla, reduciendo el pH por debajo de 4.0 a través de la producción de ácido láctico. Esta acidificación inhibe o reduce significativamente el crecimiento de otros microorganismos competidores, excepto otras bacterias lácticas y levaduras.

2.5.2 *Lactobacillus acidophilus*

De acuerdo con el trabajo realizado por Altermann et al. (2005), *Lactobacillus acidophilus*, es una especie de bacteria ácido-láctica perteneciente al género

Lactobacillus y la familia *Lactobacillaceae*, es un bacilo Gram positivo no esporulado la cual presenta forma de bastones delgados con un extremo redondeado y tiene una longitud de entre 2 y 10 μm . En cuanto a sus requerimientos aerobios la mayoría de las cepas de *L. acidophilus* son microaeróbicas, por lo que se desarrollan mejor en condiciones anaeróbicas o en atmósferas con un 5-10% de CO_2 . Esta especie presenta una temperatura óptima de crecimiento que ronda entre los 35 a 38°C, y prácticamente no crece a temperaturas por debajo de 20°C. Este microorganismo tiene baja resistencia al calor y su pH óptimo de crecimiento se sitúa entre 5.5 y 6.0.

Por otro lado, Gao et al. (2022), nos mencionan que *Lactobacillus acidophilus* es una bacteria probiótica que ha sido ampliamente estudiada debido a sus potenciales efectos positivos sobre la salud. Sus características probióticas pueden clasificarse en dos grandes categorías:

1. Propiedades probióticas esenciales (demostradas in vitro):

- Tolerancia a pH bajo: *L. acidophilus* es capaz de sobrevivir en ambientes ácidos, lo que es crucial para pasar por el estómago sin ser destruido por el ácido gástrico.
- Resistencia a la bilis: Puede resistir las sales biliares en el intestino delgado, lo que le permite colonizar de manera efectiva.
- Adhesión a células del colon humano: Esta propiedad le permite establecerse en el tracto intestinal, lo que es vital para que ejerza sus efectos beneficiosos.
- Producción de sustancias antimicrobianas: Como antibióticos naturales que inhiben el crecimiento de patógenos perjudiciales.
- Actividad de la lactasa: Ayuda en la digestión de la lactosa, lo que es beneficioso para personas intolerantes.
- Estabilidad del producto: Muestra buena viabilidad en productos comerciales probióticos, manteniendo su efectividad.

2. Efectos probióticos generales (observados en estudios en animales):

- Modulación del sistema inmunológico: Contribuye a regular las respuestas inmunitarias, ayudando al cuerpo a defenderse mejor contra infecciones.
- Reducción del colesterol sérico: Algunos estudios sugieren que *L. acidophilus* puede disminuir los niveles de colesterol en la sangre del huésped, lo que podría contribuir a la salud cardiovascular.
- Mejora del metabolismo de la lactosa: Al promover la digestión de la lactosa, reduce los síntomas de intolerancia a la lactosa.
- Prevención y tratamiento de infecciones: *L. acidophilus* ayuda a prevenir infecciones intestinales y posiblemente también de otros tipos, gracias a su capacidad para inhibir el crecimiento de patógenos.

En conjunto, estas propiedades hacen que *L. acidophilus* sea un microorganismo valioso en el mantenimiento de la salud digestiva y general del cuerpo.

2.6 Prebióticos

En lo reportado por Bamigbade et al. (2022), se considera como prebióticos a componentes alimenticios inherentes a los alimentos como frutas, verduras, hortalizas de hoja verde y granos integrales y algunos cereales, que propiamente no son digeribles, pero que pueden ser usados como fuentes de nutrientes, y por ende degradados por la microbiota que se encuentra en el tracto gastrointestinal, especialmente por los géneros *Lactobacillus* spp. y *Bifidobacterium* spp., estimulando así el crecimiento de su población. El consumo de prebióticos tiene beneficios importantes no solo para mejorar la función intestinal, si no en la salud en general, debido al hecho de que cuando la microbiota intestinal degrada dichos prebióticos produce ácidos grasos de cadena corta los cuales se liberan al tracto gastrointestinal para posteriormente ser absorbidos al torrente sanguíneo, y a los cuales se les han atribuido beneficios como agentes anticancerígenos, potenciadores inmunitarios, reducción de colesterol sérico, reducción de riesgo de desarrollo de enfermedad cardiovascular, prevención del desarrollo de obesidad, producción de compuestos antimicrobianos, entre otros.

Tabla 2. Clasificación de los prebióticos

Clasificación de los prebióticos		
Tipo	Ejemplo	Función
Fructanos	Inulina, fructooligosacaridos	Estimulación del crecimiento de BAL
Galactooligosacaridos	GOS a base de lactosa / galactosa	Estimulación del crecimiento de BAL
Oligosacáridos derivados de almidón y glucosa	Polidextrosa	Estimulación del crecimiento de bifidobacterias, producción de butirato
Oligosacáridos de la pectina	Polifenoles derivados de la cocoa	Cuidado de la integridad de la membrana celular

Por otro Gibson y Roberfroid (1995), ellos nos comentan que la definición inicial de prebióticos fue establecida en el año de 1995, lo cual sirvió como base para entender la relación entre la alimentación y la salud intestinal, de acuerdo con la definición que establecieron se considera a los probióticos como componentes alimentarios digeribles los cuales ejercen un impacto positivo en el organismo puesto que estimulas de manera selectiva el crecimiento y actividad de la población de bacterias benéficas que habitan el tracto gastrointestinal lo que conlleva a mejorar la salud del huésped. Esencialmente considera que los prebióticos actúan como un fertilizante para las poblaciones de bacterias que conforman la microbiota intestinal, favoreciendo su proliferación, lo que a su vez propicia un equilibrio saludable en el sistema gastrointestinal, siendo los prebióticos más reconocidos los fructooligosacáridos (FOS), los galactooligosacaridos (GOS) y la inulina.

De acuerdo con la definición propuesta, Roberfroid nos menciona en 2007, que se establecieron tres elementos claves para incluir a compuestos componentes alimenticios dentro de la clasificación de probióticos:

1. Resistencia a la acción de las enzimas digestivas: El compuesto en cuestión debe permanecer intacto al pasar por el sistema digestivo, no viéndose alterado por la acción de las enzimas gástricas, pancreáticas e intestinales.
2. Fermentación por parte de la microbiota intestinal: Una vez que el compuesto ha llegado al colon, este debe de ser utilizado como sustrato energético por las bacterias intestinales.
3. Estimulación selectiva de la microbiota intestinal: Se debe de promover el crecimiento y actividad de las bacterias intestinales que tienen un efecto positivo en el huésped, como son el caso de las bifidobacterias y los lactobacilos.

Sin embargo, y de acuerdo con el trabajo realizado por Gibson et al. (2017) se hace mención que debido a que dentro de la industria alimenticia han sido introducido compuestos de nueva generación y a que se han ido descubriendo nuevas clases de microorganismos probióticos, la definición de prebióticos sufrió importantes modificaciones, como la definición propuesta por Bird et. al donde se describe a los probióticos como carbohidratos no digeribles que son fermentados por la microbiota del colon, produciendo ácidos grasos de cadena corta como producto final de su metabolismo, definición que fue la imperante hasta que durante el último consenso de la asociación científica internacional para probióticos y prebióticos, donde se estableció que un prebiótico es un sustrato que es utilizado de manera selectiva por microorganismos en el huésped, confiriendo un beneficio a la salud; siendo destacable que para esta definición no se considera a la fermentación como el principal proceso metabólico para la utilización de estos compuestos, y toma como elementos principales a el uso selectivo y los beneficios a la salud. De acuerdo con la nueva definición establecida se nos presentan los siguientes puntos importantes a considerar:

1. Los prebióticos no solo se pueden administrar de manera oral, si no que tambien pueden ser administrados de manera directa en otros sitios del cuerpo colonizados por microorganismos, como lo son el tacto vaginal o la piel.
2. Sus beneficios a la salud no se limitan a únicamente la modulación de la población bacteriana de la microbiota, si no que tambien se incluyen efectos positivos en el cardiometabolismo, efectos positivos sobre la resistencia a la

insulina, sobre la hiperlipidemia, producción de metabolitos que tengan una acción positiva sobre la función cerebral, incremento de la biodisponibilidad de compuestos minerales favoreciendo la estructura ósea, etc.

3. La mayoría de los prebióticos son carbohidratos/ polisacáridos de origen vegetal, sin embargo, se toman en consideración otros compuestos que, a pesar de no estar clasificados dentro de los antes mencionados, por sus propiedades si entran dentro de la definición propuesta para prebióticos, como lo son los oligosacáridos de la leche materna, algunos fenoles y fitoquímicos, ácido linoleico conjugado y ácidos grasos poliinsaturados
4. Fibras dietéticas pueden incluirse dentro de la clasificación de prebióticos siempre y cuando sean fácilmente fermentables por la microbiota intestinal y no se vean alteradas por las enzimas producidas por el huésped.

En cuanto a los beneficios a la salud asociados a los diferentes compuestos prebióticos mencionados en el trabajo de Bevilacqua et al. (2024), estos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Beneficios asociados a los prebióticos en diferentes padecimientos.

Patología/ Condición	Compuesto prebiótico asociado	Beneficio observado
Cáncer colorrectal	Inulina / GOS	Incremento de ácidos grasos de cadena corta, reducción de pólipos en el colon.
	Oligómeros despolimerizados de quitosano	Incremento de microorganismos productores de butirato y reducción de enterobacterias.
	FOS	Efecto supresor sobre la enterotoxina de <i>Bacteroides fragilis</i>
	Inulina	Incremento de la población de <i>Lactobacillus</i> spp., reducción

Enfermedad inflamatoria de Bowel		del pH del colon, reducción del daño histológico y de la barrera mucosa.
	Resveratrol	Incremento en la población de <i>Bifidobacterium</i> spp. y <i>Lactobacillus</i> spp.
	Inulina/ FOS	Reducción de la inflamación intestinal, del factor de nefrosis tumoral y de IL-1a
	Fructanos	Incremento de la producción de butirato y mejora del cuadro de colitis
Síndrome del intestino irritable	GOS	Reducción de síntomas del síndrome (flatulencias, dolor abdominal y malestar general)
Diabetes	Oligosacáridos del café	Efecto reductor sobre la hiperglicemia y la hiperlipidemia
	Dextranos	Reducción de la hiperglicemia y de citocinas proinflamatorias
Síndrome metabólico	N-acetil-quitooligosacáridos	Reducción de la glucosa en ayunas, inhibición de la acumulación de grasa en el hígado y promover la secreción de insulina
	Proantocianidinas	Efecto positivo sobre la saciedad, potenciado por el incremento de ghrelina
Osteoporosis	FOS/ GOS	Mejor absorción de calcio, mayor resistencia y densidad ósea

2.6.1 Inulina

De acuerdo con el trabajo publicado por Cherbut (2002) se considera a la inulina como un polisacárido el cual está compuesto por cadenas de 25 a 30 moléculas de fructosa, que se encuentran unidas mediante enlaces β -(2 $\rightarrow$ 1) y con un residuo terminal de sacarosa y cuenta con un peso molecular aproximado de 6,000 Da. Se encuentra dentro de la clasificación de los fructanos, los cuales son carbohidratos que no pueden ser digeridos por el tracto gastrointestinal humano, por lo que funcionan como fibra dietética, sin embargo, son utilizados como sustrato energético por las bacterias que conforman la microbiota del colon mediante la fermentación. Asimismo se hace mención que, en las plantas la inulina cumple la función de ser un medio de reserva energética, encontrándose principalmente en raíces, tubérculos y rizomas; y además de servir como fuente de energía por su gran capacidad para almacenar agua, esta juega un papel bastante importante en el metabolismo vegetal, sobre todo durante los periodos de sequía o cuando las plantas se ven sometidas a gran estrés ambiental.

También se menciona que, aunque la inulina se encuentra en la mayoría de los productos vegetales, se encuentra en mayor abundancia en la achicoria, la cual es la principal fuente en la industria alimentaria, y también se encuentra en cantidades importantes en el ajo, los espárragos, el agave y la alcachofa.

2.6.1.1 Beneficios para la salud

De acuerdo con lo reportado por Shoaib et al. (2016) la ingesta de inulina tiene numerosos efectos benéficos para la salud del consumidor entre los cuales se encuentran su capacidad de reducir los niveles de triglicéridos en la sangre así como de disminuir de manera moderada los niveles de colesterol, así como de evitar la acumulación de triacilglicerolos en el hígado, teniendo un efecto positivo sobre la esteatosis hepática así como reduciendo el riesgo de aterosclerosis.

Asimismo los autores refieren que el consumo de inulina tiene un importante efecto sobre problemas gastrointestinales como el estreñimiento, donde presenta efectos similares a los de la fibra soluble, ayudando así a reducir el pH en el intestino, lo cual en consecuencia contribuye a mejorar este problema y a aumentar la frecuencia de

excreción de deposiciones así como a la normalización de su consistencia. También se nos menciona que el consumo de inulina juega un papel importante en la prevención y reducción de riesgo de padecer enfermedades intestinales crónicas, como son el síndrome del intestino irritable, colitis ulcerativa y la enfermedad de Crohn, donde el principal su efecto sobre estos padecimientos esta atribuido a el incremento de la proliferación de bacterias benéficas de la microbiota específicamente de los géneros *Bifidobacterium* spp. y *Lactobacillus* spp., donde el efecto probiótico y prebiótico en conjunto ha demostrado disminuir los niveles de citocinas proinflamatorias de la mucosa intestinal. Asimismo se nos es mencionado que múltiples estudios sugieren que el consumo de formulaciones de inulina y oligofructosa en conjunto con probióticos de los géneros *Bifidobacterium* spp. y *Lactobacillus* spp., ayudan a reducir el riesgo de desarrollar cáncer colorrectal, retardado la carcinogénesis, así como retardado la progresión de la enfermedad reduciendo la cantidad de lesiones características de este tipo de cáncer y reduciendo la posibilidad de que estas se vuelvan malignas.

Respecto a el efecto de suplementación con inulina sobre la absorción de minerales se nos menciona que su uso aumenta de manera importante la absorción de calcio y magnesio, encontrando que tanto en modelos animales como en humanos su consumo aumento tanto el contenido mineral en el cuerpo, como la densidad ósea.

2.6.1.2 Propiedades tecnológicas

De acuerdo con el trabajo realizado por Lara-Fiallos et al. (2017) la inulina además de sus importantes propiedades prebióticas, es valorada por su amplia aplicación en la industria alimentaria, ya sea como componente natural de ciertos alimentos o como un aditivo empleado para mejorar el perfil sensorial y funcional, por lo que se le puede considerar como un ingrediente multifuncional. Entre sus aplicaciones en la industria alimentaria destacan las siguientes:

- Sustituto de azúcares y grasas: Debido a que los fructanos hidratados en concentraciones de 40-45 %, adoptan una textura y una palatabilidad muy similar a la de la grasa, la inulina es ideal para reducir el contenido graso en productos como el yogurt, helados y salsas, por otro lado, también se utiliza

como reemplazo parcial del azúcar, puesto que aporta cierto dulzor, y por su bajo aporte calórico mejora el perfil nutricional de los alimentos.

- Mejora de la textura y la estabilidad: Ligado al punto anterior, ayuda a mejorar la estructura y palatabilidad como sustituto graso por su textura cremosa, dando a los productos donde se ocupa como sustituto una textura más agradable y homogénea.
- Estabilización de espumas: En los productos aireados contribuye a su estabilización, dándoles así una presentación más atractiva y mayor durabilidad.
- Mejora de propiedades sensoriales: En el caso de los productos lácteos fermentados ayuda a mejorar la cremosidad y equilibrar el sabor ácido, en el caso de productos como galletas y mermeladas contribuye a la mejora del sabor sin necesidad de añadir materia grasa o azúcares en exceso, en el caso de los productos panificables por su alta retención de agua ayuda a incrementar la frescura y la suavidad.

2.7 Combióticos

En la actualidad el término combiótico carece de una definición que este propiamente establecida en la literatura científica, por lo tanto el concepto al cual hace referencia no se encuentra con tal denominación en fuentes académicas, no obstante en lo que refiere al ámbito comercial y nutricional si es posible encontrarlo, y dicho término hace referencia a un producto alimenticio o farmacéutico que combina dentro de su formulación a microorganismos probióticos junto con compuestos prebióticos. Estos productos se encuentran principalmente en presentaciones como fórmulas lácteas infantiles o en suplementos alimenticios, y con la acción de ambos componentes buscan una mejora de la salud intestinal del consumidor, así como la formación o mantenimiento de una microbiota intestinal balanceada (HiPP, 2024).

4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en lo que respecta al empaquetado de alimentos son tres cosas principales las que se buscan, la primera es la preservación de las características deseables del alimento y evitar que esté expuesto al ambiente externo, para así poder prolongar su vida útil. En la segunda es buscar reducir el impacto ambiental derivado de desechos de empaques plásticos, ya que la generación de este tipo de desechos es un problema bastante importante que requiere inmediata atención para que no se siga agravando, por lo que actualmente se han buscado diversas alternativas más sustentables, como el uso de plásticos que les tome menos tiempo degradarse, generación de polímeros a partir de compuestos naturales, o incluso empaques que no requieran ser desechados por ser comestibles debido a la naturaleza de sus componentes. Por otro lado, respecto a la tercera, se busca que en lo que al empaque respecta, pueda aportar beneficios adicionales para el consumidor, y que el valor del producto no radique solo en sus beneficios nutricionales, si no en los beneficios adicionales a la salud derivados de compuestos funcionales, los cuales pueden ser añadidos en la formulación de un empaque comestible, por lo que se considera que el uso de biopelículas comestibles como medio de preservación de alimentos puede llegar a ser una buena alternativa en el empaquetado de alimentos por el bajo o nulo impacto ambiental y generación de desechos que estos tienen, su capacidad de actuar como una barrera física que mantiene al producto protegido del medio externo y su versatilidad para poder enriquecer su formulación con compuestos que puedan aportar beneficios adicionales a la salud del consumidor.

5. OBJETIVOS

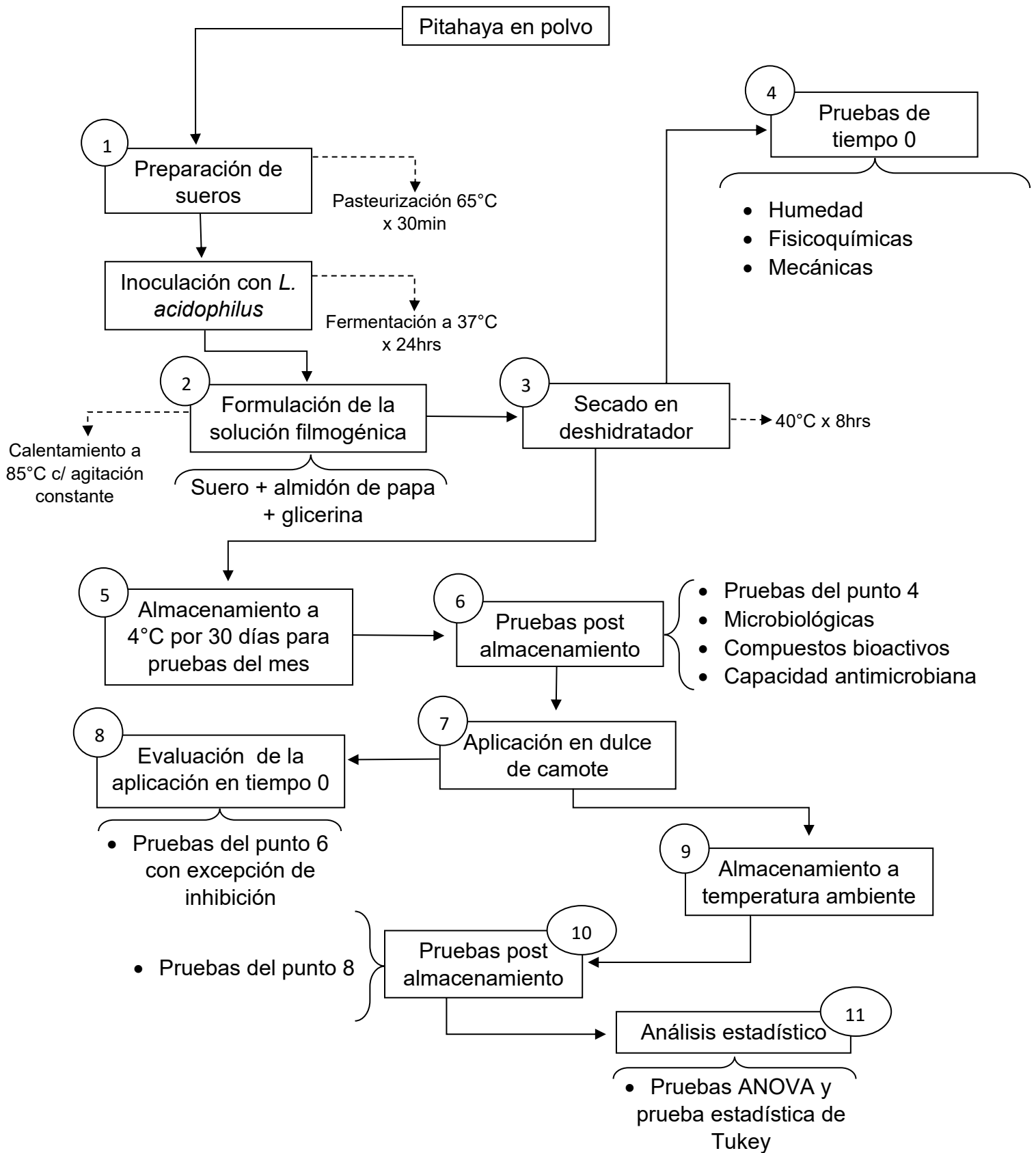
5.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar, caracterizar y aplicar una película comestible combiótica a base de pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), probióticos (*Lactobacillus acidophilus*) y prebióticos (inulina)

5.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Formular una base filmogénica para elaborar películas comestibles a base de pitahaya roja, probióticos y prebióticos.
- Desarrollar películas comestibles a partir de la base filmogénica formulada, caracterizarlas en sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y colorimetría, y comparar sus propiedades tras su elaboración y bajo condiciones de almacenamiento.
- Determinar la población de *L. acidophilus*, el efecto antimicrobiano, el contenido de cuerpos fenólicos y capacidad antioxidante de las películas desarrolladas bajo condiciones de almacenamiento.
- Seleccionar una película comestible para su aplicación en el dulce de camote de fresa y evaluar su efecto sobre las propiedades del dulce bajo condiciones de almacenamiento.

6. DIAGRAMA DE TRABAJO



7. MATERIALES Y MÉTODOS

Material de vidrio: El necesario para cada determinación.

Material biológico: Pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), suero de leche, inulina, edulcorante, cepa de *Lactobacillus acidophilus* (NRRL-B-4495) y cepa de *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028).

Reactivos: Los necesarios para cada determinación grado analítico o grado alimenticio.

En la Tabla 4 se muestran las técnicas utilizadas y en la Tabla 5 los equipos con los que se trabajó.

Tabla 4. Métodos y referencias utilizados

Determinación	Técnica	Referencia
Humedad	Secado en estufa	AOAC (2000)
°Brix	Refractometría	NMX-F-103-NORMEX-2009
pH	Potenciometría	NOM-F-317-S-1978.
Acidez titulable	Volumetría	NMX-F-102-NORMEX-2010
Color	Colorimetría	Aparicio-Fernández et al. (2018)
Compuestos fenólicos	Método espectrofotométrico	Aparicio-Fernández et al. (2018)
	Folin-Ciocalteu	
Capacidad antioxidante	DPPH	Aparicio-Fernández et al. (2018)

Bacterias acido-lácticas (BAL)	Vertido en placa	NOM-092-SSA1-1994
Inhibición microbiana	Extendido en superficie	NOM-115-SSA1-1994
Espesor	Medición aleatoria de bordes con vernier	Hernández-Carranza et al. (2024)
Permeabilidad al vapor de agua	Medición gravimétrica	Mora-Sánchez et al. (2023)
Simulación gástrica	Vertido en placa	Macías-González et al. (2024)
Textura	Fuerza tensil, resistencia a compresión, resistencia a penetración.	Hernández-Carranza et al. (2024)

Tabla 5. Equipos utilizados

Equipo	Marca	Modelo
Autoclave	CISA	AS-25
Balanza analítica	Ohaus – Serie Pioneer	PA 224C
Baño de agua AquaBath	Barnstead Lab-Line	18005AQ
Contador de colonias	SOL-BAT	Q-20
Incubadora orbital	Prendo	INO-650
Incubadora	Luzern	DHP952
Medidor de pH portátil	Conductronic	PH10
Parrilla digital	Fisher Scientific	Isotemp
Espectrofotómetro	Spectronic instruments	20 genesys

Refractómetro	Hanna	HI96801
Refrigerador	MABE	RMT510
Colorímetro	PCR	TCR 200
Texturometro	Texture Analyser	TA.XT.plus
Bernier	Surtek	----
Desecador	Escalibur	----
Horno	Felisa	----

8. METODOLOGÍA

De acuerdo con lo mostrado en el esquema de trabajo, a continuación, se describe la metodología que se siguió.

8.1 Formulación de la solución filmogénica

La Tabla 6 muestra las formulaciones de los sueros que se elaboraron, mismos que se pasteurizaron a 65°C durante 30 min con agitación constante y posteriormente se inocularon con 1 mL de cultivo de *L. acidophilus* (1-2 X 10⁸ UFC/mL) y se incubaron a 37°C durante 24 h para que el suero fermentara.

Tabla 6. Formulación de cada uno de los sistemas (por cada 100mL)

Sistema	Suero de leche 10%	Inulina 5%	Pitahaya roja en polvo 2%	Probiótico ^a (<i>L. acidophilus</i>)
EF1	X	--	--	--
EF2	X	--	--	X
EF3	X	X	--	--
EF4	X	X	--	X
EF5	X	--	X	--
EF6	X	--	*X	X
EF7	X	X	X	--
EF8	X	X	*X	X

^a: 1mL de suspensión de probiótico (1 – 2 x 10⁸ UFC)

*En el caso de los sueros adicionados con probiótico y pitahaya roja en polvo, la pitahaya se añadió a la formulación posterior a la fermentación.

Al termino de incubación o formulación, según sea el caso, se usaron los sueros como base para preparar la solución filmogénica, para lo cual se agregaron 10g de almidón de papa de grado alimenticio en 100 mL de agua, se le agregaron 4mL de glicerina como agente plastificante y se colocaron en agitación constante hasta alcanzar 85°C, punto en el cual el almidón retrogrado. Se espero a que el almidón retrogradado bajara de temperatura a 40°C para incorporar de a poco el suero,

mezclando vigorosamente con agitador de vidrio hasta obtener una solución lo más homogénea posible y libre de grumos, la cual dio como resultado 200mL de solución filmogénica.

8.2 Preparación de las películas comestibles

Utilizando cajas de papel encerado de 13.5 x 9 x 2.5 cm se vertieron 60g de la solución filmogénica, para posteriormente colocarlas en un deshidratador de alimentos a una temperatura de 40°C durante aproximadamente 8h. Una vez terminado el secado la mitad del lote de películas se colocaron en bolsas herméticas y permanecieron almacenadas en refrigeración a 4°C durante 30 días y el resto se sometieron a las pruebas de tiempo 0.

8.3 Determinación del porcentaje de humedad

Se determinó el porcentaje de humedad de las películas comestibles por gravimetría, para lo cual fueron llevadas a secado en horno a 105°C hasta alcanzar peso constante, el procedimiento se hizo por duplicado usando muestras de 3g (925.25, AOAC, 2000).

8.4 Caracterización colorimétrica

Los parámetros de luminosidad (L^*), eje rojo-verde (a^*) y eje amarillo-azul (b^*) de la escala CIELab se evaluaron usando un colorímetro de precisión en modo reflectancia (TCR 200, TIME High Technology, Beijing, China). Las mediciones se llevaron a cabo en cinco puntos en la superficie de las películas comestibles, el ángulo *Hue* y el cambio total de color (ΔE) se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1.
$$Hue = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*}$$

Ecuación 2.
$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

$L_0^*, a_0^*, b_0^*, L^*, a^*$ y b^* corresponden a los parámetros antes y después del periodo de almacenamiento respectivamente.

8.5 Determinación de pH y acidez titulable

Se prepararon soluciones acuosas en proporción 1:10 en agitación constante y se procedió a la medición de pH por potenciometría, la acidez titulable por con NaOH al 0.1 N como titulante y fenolftaleína como indicador.

8.6 Caracterización de compuestos bioactivos de las películas comestibles

Se realizaron mediante técnicas espectrofotométricas, se aplicó la metodología descrita por Aparicio-Fernández et al. (2018). Para ambas pruebas se preparó una solución en proporción 1:10 con agua destilada, mezcla que fue pasada por un vortex durante 1 minuto, filtrada con algodón para eliminar residuos y turbidez para ser usada posteriormente para la cuantificación. En el caso de compuestos fenólicos totales 1mL del extracto se mezcló con 1mL del reactivo de Folin-Ciocalteu (0.1N), a los tres minutos se le agregó 1mL de Na_2CO_3 (0.05%). La mezcla se dejó reposar durante 30 minutos a temperatura ambiente, para su posterior lectura de absorbancia a 765nm usando un espectrofotómetro UV-VIS. Los compuestos fenólicos se cuantificaron usando una curva de calibración de ácido gálico. En el caso de capacidad antioxidante se determinó mediante la inhibición del radical DPPH^+ . A 1mL del extracto se le agregó 1mL del radical DPPH^+ (0.004%), la mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente para posteriormente medir la absorbancia a 517nm usando un espectrofotómetro UV-VIS, usando Trolox como estándar para la determinación de la capacidad antioxidante.

8.7 Análisis de la población del probiótico en las películas comestibles

Se determinó la población del probiótico en las películas comestibles formuladas a base de sueros fermentados. Se colocó 1g de película comestible en 10mL de agua peptonada y se pasó por un vortex por 10s, posteriormente se realizaron diluciones con agua peptonada, tomando 1mL de la dilución 10^{-5} y se aplicó el método de vertido en placa, en agar MRS. Se incubaron a 37°C durante 24 h en condiciones de anaerobiosis. Posteriormente, se realizó el conteo de colonias y se expresó como UFC/g.

8.8 Pruebas mecánicas

Se midió el espesor de las películas con un vernier tomando las mediciones de cada uno de sus lados, asimismo se evaluó la permeabilidad al vapor de agua de las películas colocando 10mL de agua en vasos del número 0, los cuales fueron cubiertos con una porción de película y sellados con Parafilm, monitoreando el peso de cada sistema cada 2h durante un lapso de 10h para así calcular la WVP mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 3.
$$WVP \left(\frac{g \text{ mm}}{h \text{ m}^2 \text{ kPa}} \right) = \frac{(WVTR)L}{\Delta P}$$

Donde *WVTR* es el ratio de transmisión de vapor de agua (g/h m²), *L* es el espesor de la película comestible en mm y ΔP es la diferencia de la presión parcial de vapor de agua (kPa).

Usando un texturómetro se llevó a cabo la prueba de textura donde se evaluó la fuerza tensil y la elongación al quiebre de las películas comestibles.

8.9 Evaluación post almacenamiento

Pasados 30 días desde su preparación las películas comestibles que se habían mantenido almacenadas en refrigeración a (5°C) fueron sometidas a las pruebas mencionadas en los apartados del 7.3 al 7.7.

8.10 Análisis de la actividad antimicrobiana

Pasados los 30 días de almacenamiento, mediante la técnica de extendido en superficie se sembraron placas con 100μL (4-8 × 10⁶ UFC/mL) de *S. typhimurium* en agar SS. Una vez evaporado el exceso de inóculo se aplicó por duplicado discos de 2cm de diámetro de las películas comestibles sobre la superficie del agar. Las placas se dejaron incubar a 37°C durante 24h para posteriormente retirar los discos de películas de la superficie del agar y se evaluó el crecimiento de los microorganismos ante la presencia de las películas comestibles.

8.11 Aplicación de las películas comestibles

Se aplicó el sistema EF8, pues presentó las mejores características, como envoltura para dulce de camote de fresa, para lo cual se preparó un nuevo lote del

sistema EF8 y se envolvió al dulce posterior al secado, donde la mitad fueron almacenados a temperatura ambiente en una caja de carton para su evaluación post almacenamiento a las dos semanas, y la otra mitad fueron sometidas a las pruebas a tiempo 0.

8.12 Evaluación del alimento recubierto

Se llevaron a cabo las pruebas mencionadas en los apartados 7.3 al 7.8 con excepción de la permeabilidad al vapor de agua, para el caso de las pruebas mecánicas del apartado 7.7 solo se llevó a cabo la prueba de textura, pero en este caso se evaluó la resistencia a la compresión y a la penetración y únicamente se realizaron tras el almacenamiento, para todas las pruebas se evaluó el dulce de camote recubierto con la película comestible vs el dulce de camote sin cobertura.

8.13 Evaluación tras el almacenamiento

Los dulces de camote recubiertos que fueron almacenados se sometieron a las pruebas mencionadas en el apartado 7.11.

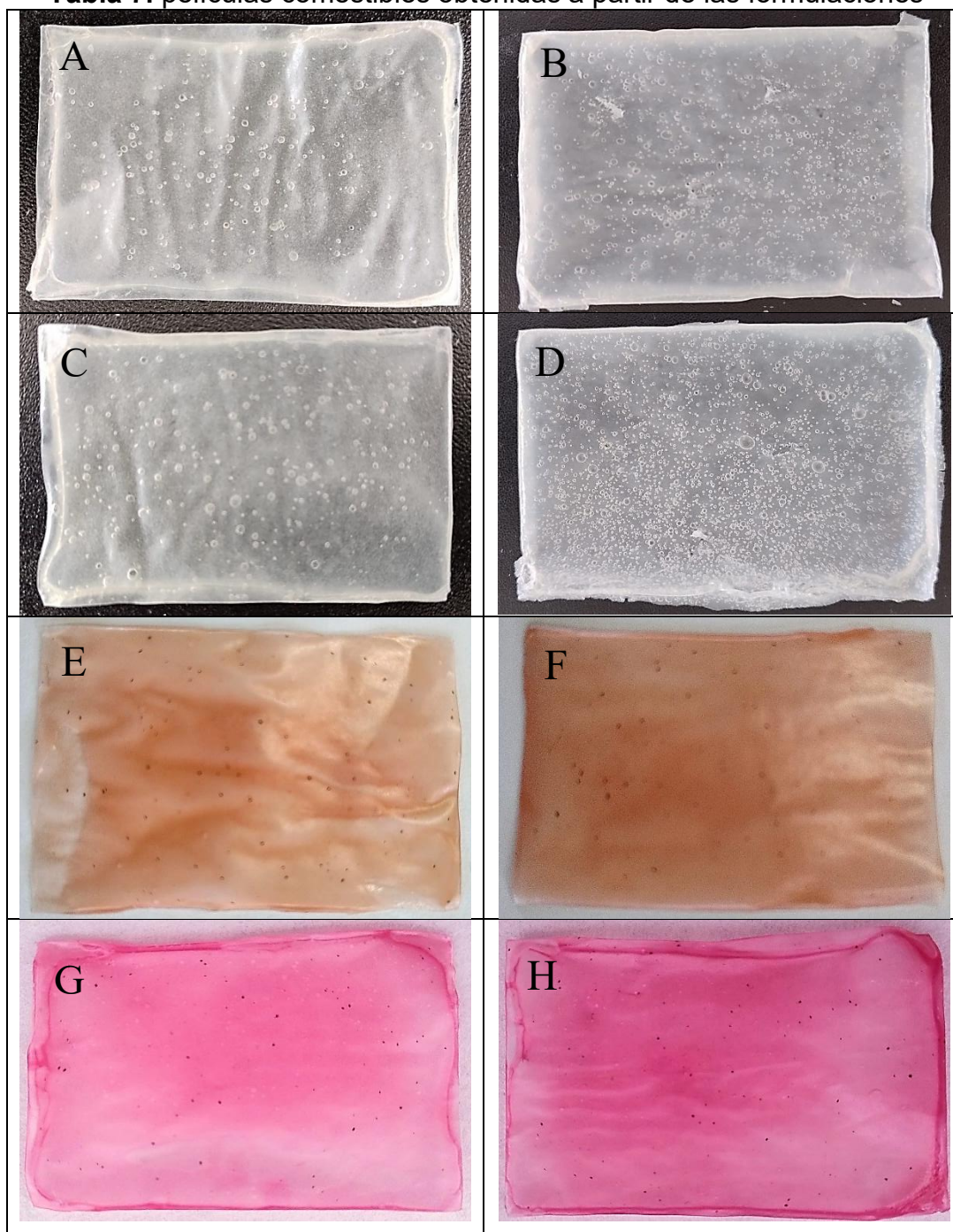
8.14 Análisis estadístico

Se realizó mediante la prueba de ANOVA y los resultados fueron analizados mediante la prueba estadística de Tukey, empleando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, empleando el software de Minitab 14.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 7 se presentan las películas comestibles correspondientes a los sistemas EF1 (A), EF2 (B), EF3 (C), EF4 (D), EF5 (E), EF6 (F), EF7 (G) y EF8 (H).

Tabla 7. películas comestibles obtenidas a partir de las formulaciones



9.1 Propiedades fisicoquímicas

En la Tabla 8 se presentan las propiedades fisicoquímicas de los diferentes sistemas con los que se trabajaron. Se determinó que el porcentaje de humedad de las películas comestibles se encontraba en el rango de 9.3 a 14.2%, posterior al almacenaje durante treinta días se determinó nuevamente el porcentaje de humedad y no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas al tiempo 0 y después del almacenaje ni entre las formulaciones, donde se obtuvo una media de 12.3 ± 1.1 %, manteniendo un porcentaje bajo de humedad. Los resultados obtenidos de este parámetro corresponden a los resultados reportados por Hernández et al. (2023), donde se determinó una media de porcentaje de humedad en películas comestibles a base de almidón y suero de leche de 12.68 ± 1.14 % lo cual de acuerdo con el trabajo presentado por Fematt et al. (2022) es un punto importante en la conservación de alimentos pues es indicativo de estabilidad durante el almacenaje y a largo plazo, lo cual puede deberse a su baja actividad de agua y también está relacionada con una mayor estabilidad en sus propiedades mecánicas y a que sean menos propensas al deterioro. En cuanto a los valores obtenidos de las determinaciones de pH y acidez titulable, estos son directamente dependientes del proceso de fermentación de las soluciones filmogénicas, presentando un menor valor de pH y mayor acidez titulable aquellos sistemas cuya base es una solución filmogénica previamente fermentada, como lo son los sistemas 2, 4, 6 y 8, a diferencia de sus contrapartes no fermentadas las cuales presentaron mayores valores de pH y menores valores de acidez titulable; en general se pudo encontrar diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones tanto al tiempo 0 como después del almacenaje, presentándose dicha diferencia precisamente entre las formulaciones fermentadas y no fermentadas, tanto para los valores de pH como para la acidez titulable. En cuanto a la comparación intrasistema al tiempo 0 y post almacenaje no se encontró diferencia estadísticamente significativa en los sistemas no fermentados, caso contrario de los sistemas fermentados, donde si existe una diferencia estadísticamente significativa y un ligero incremento en los parámetros de pH y acidez titulable. Según lo mencionado por García-Argueta et al. (2013) se describe que la incorporación de probióticos, en este caso *Lactobacillus casei* probó el propiciar un efecto acidificante en películas comestibles durante el proceso de almacenaje, esto debido a actividad metabólica y producción de ácido láctico de los probióticos encapsulados en la matriz de las películas, de igual manera en el trabajo presentado por Pavli et al. (2017) se obtuvieron resultados que indican que la incorporación de BAL como probióticos en películas comestibles a base de alginato presentan un efecto acidificador no solo sobre las mismas películas si no sobre el alimento donde son aplicadas. Sin embargo en la investigación llevada a cabo por Pires et al. (2024) se describe que, en caso de darse una alza del pH tras el periodo de almacenamiento en películas adicionadas

con probióticos, puede deberse a la disminución de la viabilidad de los probióticos encapsulados en la matriz de la película, lo que afectaría la producción de ácido por parte de los microorganismos, además de este factor en el trabajo publicado por Gentile (2020) se considera que en las formulación a base de proteínas como las del suero y polisacáridos como el almidón o inulina tienden a formar complejos con efecto tampón que modifican y estabilizan el pH.

Finalmente otra potencial causa que se consideró para el aumento de pH en los sistemas fermentados y también de la humedad tras el periodo de almacenamiento fue una posible contaminación por microorganismos asociados al deterioro, la literatura describe que en productos alimenticios bioactivos elaborados a base de carbohidratos y proteínas, la presencia de levaduras, bacterias mesófilas aerobias y BAL ambientales puede generar cambios en estos parámetros debido a su actividad metabólica, tal es el caso de Hallsword et al. (2022), quienes mencionan que en el caso de la humedad por modificaciones estructurales asociadas a degradación de la película comestible por metabolización de componentes, se genera agua como subproducto metabólico, lo que en consecuencia aumenta el porcentaje de humedad de la película y la hace más propensa a retener agua por el daño generado a su estructura. Por otro lado en cuanto al pH Doeun et al. (2017), describe que los microorganismos asociados al deterioro ocupan la materia proteica presente en productos alimenticios, causando descarboxilación de aminoácidos y en consecuencia produciendo aminas de carácter básico, las cuales conforme se acumulan aumentan el pH del alimento en cuestión. Estos mecanismos hacen sentido y podrían ser una causa probable a los cambios presentados en las propiedades fisicoquímicas de los sistemas con los que se trabajaron, indicando una estrecha relacion entre la estabilidad microbiológica y la estabilidad fisicoquímica, sin embargo, no se puede tomar como una causa absoluta puesto que tambien es importante considerar que los sistemas mantuvieron una bajo porcentaje de agua durante el almacenamiento y de acuerdo con Fematt et al. (2022) es indicativo de una baja actividad de agua, lo cual limita el desarrollo de microorganismos asociados al deterioro, sumado a esto Zambrano et al. describe en 2019 que para evitar deterioro en productos alimenticios asociado a contaminación microbiana el porcentaje de humedad de los alimentos debe mantenerse en un rango de entre 10 – 12%, lo cual hace poco probable que en los sistemas trabajados se presentara deterioro y alteración de las propiedades antes mencionadas por actividad metabólica de microorganismos asociados al deterioro, sin embargo no se puede descartar en su totalidad, por los que se requieren estudios más detallados para determinar tanto la actividad de agua de los sistemas con los que se trabajaron, como de calidad microbiológica para determinar si hay presencia de microorganismos asociados al deterioro.

Tabla 8. Resultados de pruebas para porcentaje de humedad y propiedades fisicoquímicas.

Propiedad	Almacen. (Días)	Películas comestibles							
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
Humedad (%)	0	9.3±0.1 _{cA}	13.5±0.4 _{abA}	10.3±1.6 _{bcA}	14.2±0.7 _{aA}	11.3±0.7 _{bcA}	11.6±0.6 _{abcA}	11.0±0.8 _{bcA}	10.3±0.4 _{bcA}
	30	12.0±0.7 _{aA}	13.0±0.6 _{aA}	10.8±0.0 _{aA}	11.8±1.3 _{aA}	11.1±2.0 _{aA}	14.3±0.8 _{aA}	13.1±0.4 _{aA}	12.2±0.3 _{aA}
pH	0	6.0±0.0 _{aA}	4.7±0.0 _{bB}	6.1±0.0 _{aA}	4.7±0.0 _{bcB}	6.0±0.0 _{aA}	4.6±0.0 _{cB}	6.0±0.0 _{aA}	4.7±0.0 _{bcA}
	30	6.1±0.1 _{aA}	4.9±0.1 _{cA}	6.0±0.0 _{aA}	4.9±0.0 _{cA}	6.0±0.0 _{abA}	4.7±0.0 _{dA}	5.9±0.0 _{bB}	4.8±0.1 _{dA}
Acides titulable (% ácido cítrico)	0	0.1±0.0 _{bA}	0.1±0.0 _{aB}	0.1±0.0 _{bA}	0.1±0.0 _{aA}	0.1±0.0 _{bA}	0.1±0.0 _{aB}	0.1±0.0 _{aA}	0.1±0.0 _{aB}
	30	0.1±0.0 _{bA}	0.2±0.0 _{aA}	0.1±0.0 _{bA}	0.1±0.0 _{aA}	0.1±0.0 _{bA}	0.2±0.0 _{aA}	0.1±0.0 _{bA}	0.2±0.0 _{aA}

^aDiferentes letras a, b, c... para la misma propiedad en el mismo tiempo de almacenamiento son estadísticamente diferentes (p < 0,05). Diferentes letras A y B para la misma película comestible (EF) y la misma propiedad son estadísticamente diferentes (p < 0,05).

9.2 Propiedades mecánicas

En la Tabla 9 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de los diferentes sistemas con los que se trabajaron. Al momento de su elaboración el espesor de las películas se encontró entre 0.4 y 0.5mm y posterior a los 30 días de almacenamiento el sistema EF2 presentó el menor valor de espesor con 0.3mm, presentando este sistema una diferencia estadísticamente significativa (p < 0,05). A comparación de los demás sistemas donde los valores post almacenamiento no presentan una diferencia estadísticamente significativa. En gran medida el espesor de una película comestible es dependiente de los sólidos en su composición, y a mayor cantidad de solidos totales en la formulación mayor será el espesor de la película comestible, tal como se menciona en el trabajo presentado por Hafnimardiyanti et al. (2016). De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo observar una disminución en el espesor en los sistemas que incluían probióticos en su formulación.

En cuanto a la WVP esta se situó en un rango entre los diferentes sistemas de 1.7 a 12.2 × 10⁻¹⁰ (g mm/h m² kPa), tanto al momento de producción (tiempo 0) como después del almacenamiento y sin presentar una diferencia estadísticamente significativa entre la evaluación al tiempo 0 y después de 30 días entre los diferentes sistemas, por lo que de acuerdo a esto se puede decir que el tiempo de almacenaje no supone un impacto significativo sobre los componentes de la formulación ni sobre como estos afectan su permeabilidad al vapor de agua, lo cual es indicativo de estabilidad en la composición de las películas comestibles ante el periodo de almacenaje. Los resultados obtenidos coinciden con resultados presentados en otros trabajos previamente realizados, como es el caso de Hernández et al. (2024), donde en los resultados obtenidos se obtuvieron valores entre 0.4 a 5.8 × 10⁻¹⁰ (gm/sm²Pa) para películas comestibles

con formulación a base de almidón de papa y pulpa de mango, valores que se encuentran dentro del rango de los obtenidos en este trabajo.

Como se mencionó antes la diferencia existente en el valor de la WVP entre el tiempo 0 y después del almacenamiento no supone una diferencia significativa para este parámetro, sin embargo si resulta importante mencionar que el descenso de la WVP después del periodo de almacenamiento está ligado o diferentes factores, inicialmente como lo menciona Fatima et al. (2024), al momento de la elaboración las películas comestibles presentan una mayor movilidad molecular en el interior de la matriz y existe una mayor contenido de plastificante/agua libre, lo cual en conjunto favorece una mayor difusión del vapor de agua. No obstante, durante el periodo de almacenamiento se presentan varios fenómenos que impactan la capacidad de la película de ser permeable al vapor de agua. Jiménez et al. (2012) se menciona que entre estos fenómenos tenemos a la retrogradación de almidón, fenómeno en el cual las cadenas de amilosa se reorganizan con el pasar del tiempo formando así dominios cristalinos en el interior de la película, dichos dominios son menos accesibles al agua y reducen la conectividad de los microcanales por los cuales difunde el vapor de agua, bajando así el nivel de difusividad efectiva. Otro fenómeno que se presenta es la redistribución y evaporación del plastificante empleado en la formulación de las películas; de acuerdo con la investigación realizada por Eslami et al. (2023), a medida que pasa el tiempo de almacenamiento el plastificante migra a la superficie de la película pudiendo migrar fuera de él, provocando así pérdida parcial, o agruparse en fases en la superficie. Ambas situaciones suponen una disminución en la WVP puesto que el plastificante aumenta la permeabilidad de la matriz de la película y una reducción en la cantidad de este por migración reduce su permeabilidad, por otro lado la redistribución en su superficie puede cerrar microporos de la película o dar como resultado una capa superficial menos permeable.

Cabe mencionar que una reducción de la WVP en películas comestibles no supone algo completamente negativo pues esto supone una mejor capacidad de barrera contra la humedad ambiental, especialmente para los alimentos altamente higroscópicos, lo que retarda la absorción de humedad y alarga la vida útil del producto, tal como fue reportado por Lee et al. (2020).

En cuanto a las propiedades de fuerza tensil (TS) y elongación al rompimiento (EAB) los valores obtenidos se situaron entre 0.7 – 1,4 MPa y 1.1 – 5.3% respectivamente. Ninguna de estas propiedades presentó un cambio significativo pasado el periodo de almacenamiento. En el caso de EAB no hubo diferencia significativa en los valores entre sistemas ni en el tiempo 0 ni después del almacenamiento, lo cual es indicativo que los componentes de la formulación no tuvieron un impacto sobre esta propiedad,

mismo caso en la TS posterior al almacenamiento entre sistemas, solamente en el tiempo 0 de la TS se presentó una diferencia estadísticamente significativo entre los sistemas 3, 4, 7 y 8 respecto a los sistemas 1, 2, 5 y 6; revisando la tabla 4 de composiciones de los sistemas podemos notar que la diferencia se presenta entre los sistemas que tienen inulina en su composición vs los que no la tienen, teniendo una mayor TS aquellos sistemas carentes de inulina. Los valores obtenidos para estas propiedades en este trabajo resultaron ser menores a los datos reportados en otros trabajos, donde se reportaron valores de 36 MPa y 14% para TS y EAB para películas a base de almidón de maíz, TS de 34–40 MPa y EAB 22–25% para formulaciones de almidón de papa/ gelatina, TS de 40.3 MPa y EAB de 59.95% para formulaciones a base de almidón de tapioca y TS de 3.2-6.8 MPa y EAB de 4.9-79.5 % para formulaciones a base de almidón de maíz y aislado de proteína de pimiento rojo (Chen, H. et al. 2001), (Santhosh, R. et al. 2024) (Raajeswari, P. et al. 2025), (Akinci et al. 2024).

Entre las posibles causas para un valor reducido de estas propiedades mecánicas aquel que potencialmente tuvo una mayor importancia y que pudo ser la causa principal en los sistemas con los que se trabajaron es la relacionada con el contenido de sólidos de la formulación. Diversas investigaciones han encontrado que un contenido de sólidos elevado en la solución filmogénica impacta de manera negativa las propiedades de TS y EAB de las películas producidas, mecanismos que se explican más a detalle en los siguientes puntos:

- Gelatinización incompleta: De acuerdo con Fu et al. (2022), el contenido de agua es vital para una correcta gelatinización y retrogradación del almidón, por lo que una mayor contenido de sólidos en la formulación y menos agua disponible limitan la hinchazón de los gránulos y la disolución de las cadenas de almidón, dando como resultado una matriz con redes poliméricas heterogénea haciendo a la matriz menos cohesiva y disminuyendo así tanto la TS como la EAB.
- Estructura más densa y quebradiza: De acuerdo con la revisión realizada por Jiménez et al. (2012) sobre la formulación de biopelículas comestibles a base de almidón, cuando existe más material sólido y menos fase acuosa las cadenas poliméricas tienen menor capacidad para moverse, orientarse y enlazarse de manera correcta durante el secado, lo que da como resultado una matriz más compacta con baja porosidad, alta rigidez y microfracturas internas que se comportan como puntos de iniciación de fracturas bajo tensión. Estos factores sumados

dan como resultado una reducción en la deformación plástica lo que por ende reduce los valores de TS y EAB.

- Distribución no uniforme del plastificante: Fu et al. (2022) mencionan que en soluciones filmogénicas donde la concentración de solidos es mayor, la difusión del plastificante se ve limitada, lo que ocasiona que no se disperse de manera homogénea y que migre a la superficie de la película, formándose así microdominios con menos plastificante, más rígidas y quebradizas que terminan por afectar las propiedades mecánicas. De acuerdo con He et al. (2024), esta heterogeneidad en la matriz de la película conduce a la formación de interfaces entre dominios con diferente rigidez que concentrándose en estos el estrés mecánico ante una carga externa, provocando fisuras prematuras y viéndose reducida tanto la TS como la EAB.

Tomando en cuenta lo anterior podemos decir que las bajos valores de las propiedades mecánicas de las películas formuladas puede deberse al alto contenido de solidos (>10%), a comparación de las formulaciones trabajadas en otros trabajos donde el contenido de solidos fue de entre 2.5 y 5%

Tabla 9. Resultados de pruebas para propiedades mecánicas.

Propiedad	Almacen. (Días)	Películas comestibles							
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
Espesor (mm)	0	0.5±0.1 _{aA}	0.4±0.0 _{bA}	0.4±0.1 _{baA}	0.5±0.1 _{abA}	0.5±0.1 _{aA}	0.5±0.0 _{abA}	0.5±0.0 _{aB}	0.5±0.0 _{aA}
	30	0.5±0.0 _{bA}	0.3±0.0 _{cB}	0.5±0.0 _{abA}	0.5±0.0 _{bA}	0.6±0.0 _{abA}	0.5±0.1 _{abA}	0.6±0.0 _{aA}	0.5±0.0 _{abA}
WVP x 10 ⁻¹⁰ (g mm/h m ² kPa)	0	2.1±1.3 _{bA}	5.4±0.4 _{abA}	1.7±0.5 _{bA}	6.1±4.3 _{abA}	5.6±0.9 _{abA}	4.2±0.4 _{aA}	12.2±4.1 _{aA}	2.6±0.1 _{bA}
	30	5.8±2.7 _{aA}	8.2±1.4 _{aA}	0.7±0.3 _{aA}	2.9±2.5 _{aA}	6.5±2.9 _{aA}	2.9±2.1 _{aA}	1.3±0.3 _{aA}	1.9±1.4 _{aA}
TS (MPa)	0	1.2±0.0 _{aA}	1.2±0.0 _{aA}	1.0±0.0 _{abA}	0.7±0.1 _{bA}	1.0±0.2 _{abA}	1.2±0.1 _{aA}	0.7±0.1 _{bA}	0.9±0.0 _{bA}
	30	1.3±0.0 _{aA}	1.4±0.1 _{aA}	0.9±0.1 _{aA}	0.8±0.3 _{aA}	1.0±0.1 _{aA}	1.1±0.5 _{aA}	1.0±0.1 _{aA}	1.1±0.0 _{aA}
EAB (%)	0	1.1±0.2 _{aA}	1.7±0.3 _{aA}	1.9±1.1 _{aA}	5.3±3.8 _{aA}	0.4±0.2 _{aA}	1.1±0.3 _{aB}	2.0±0.8 _{aA}	2.1±0.2 _{aA}
	30	4.6±4.8 _{aA}	2.3±0.1 _{aA}	2.1±0.7 _{aA}	2.2±0.2 _{aA}	1.1±0.4 _{aA}	2.9±0.2 _{aA}	2.9±1.0 _{aA}	1.4±1.2 _{aA}

^aDiferentes letras a, b, c... para la misma propiedad en el mismo tiempo de almacenamiento son estadísticamente diferentes (p < 0,05). Diferentes letras A y B para la misma película comestible (EF) y la misma propiedad son estadísticamente diferentes (p < 0,05).

9.3 Parámetros de color

En la Tabla 10. Se presentan los parámetros de color para las películas comestibles formuladas al principio y al final del almacenamiento. Como se puede notar en los resultados los valores de los parámetros de color L^* y a^* de la películas formuladas sin polvo de pitahaya no presentaron ningún cambio estadísticamente significativo posterior al tiempo de almacenamiento, presentando valores que varían entre 85.2 a 89.8 y 1.1 a 3.2 respectivamente. Sin embargo en las formulaciones sin polvo de pitahaya que pasaron por proceso de fermentación (las que presentan el probiótico) mostraron una reducción en los valores del parámetro b^* mostrando una mayor tendencia hacia el espectro azul. Por otro lado las películas que fueron formuladas con polvo de pitahaya (EF5, EF6 EF7 y EF8) mostraron reducción en el parámetro L^* en un rango de 69.1 a 53.2, y en el parámetro b^* en un rango de -3.6 a -8.8, así como un incremento en el parámetro a^* del eje verde-rojo en un rango de 25.3 a 41.6, lo cual es indicativo de un incremento del tono rojizo, cosa que en comparación de los sistemas EF1 al 4 no ocurrió debido a no tener polvo de pitahaya en su formulación, en cambio en los sistemas donde sí estuvo presente dio como resultado un tono rosado medio claro (#d199b3 en el código de color Hex) y un tono rosado (#c46c95 en el código de color Hex), como se muestra en la Figura 2.

De acuerdo con Pramitasari et al. (2022), una variación de pH de 3 a 6 da como resultado una baja reducción de los parámetros a^* y b^* , lo cual también se complementa con el análisis colorimétrico tanto de extracto pitahaya como de películas comestibles a diferente pH, donde en el primer caso se encontró una coloración púrpura-rojiza constante entre pH 2-8 y presentándose un cambio perceptible a una coloración púrpura a pH 8; mientras que en el análisis de películas comestibles la coloración púrpura-rojiza fue constante entre pH 2-9, y empezando a presentar un cambio de coloración perceptible a tonos amarillentos a pH 10. Estos resultados coinciden con la tendencia observada en los resultados de este trabajo, donde la coloración púrpura-rosada de las películas se mantuvo constante en el rango de pH trabajado (4-6). Posterior al proceso de almacenamiento el cambio de coloración total fue en general menor en aquellos sistemas en los que no se añadió polvo de pitahaya, sin embargo específicamente para el sistema EF8, el cual incluyó todos los componentes en su composición, presentó un cambio de coloración

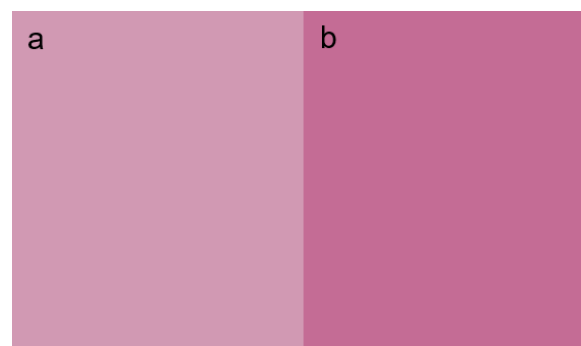


Figura 2. Tonos rosados correspondiente a los códigos #d199b3 y #c46c95 en el código de color Hex

total en el límite $\Delta E= 3$, valor el cual de acuerdo con lo reportado por Singh et al. (2020) corresponde a un cambio de coloración apenas perceptible para el ojo humano.

Tabla 10. Resultados de análisis colorimétrico.

parámetro de color	Almacen. (Días)	Películas comestibles							
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
L^*	0	85.2±0.6 ^{aA}	88.2±2.0 ^{aA}	85.2±0.6 ^{aA}	88.0±1.6 ^{aA}	64.9±4.2 ^{bcA}	56.8±3.2 ^{dA}	69.1±1.5 ^{bA}	62.3±2.3 ^{cdA}
	30	86.9±0.9 ^{aA}	89.8±0.7 ^{aA}	85.2±0.5 ^{aA}	87.4±1.4 ^{aA}	61.7±0.4 ^{bA}	53.2±7.1 ^{bA}	59.8±4.4 ^{bB}	60.8±3.0 ^{bA}
a^*	0	1.1±0.8 ^{dA}	3.2±0.7 ^{dA}	1.9±0.1 ^{dA}	3.2±0.1 ^{dA}	31.6±4.0 ^{bA}	39.6±1.6 ^{aA}	25.3±1.2 ^{cB}	33.6±1.9 ^{bA}
	30	2.0±0.2 ^{bA}	3.1±0.3 ^{bA}	2.0±0.1 ^{bA}	2.7±0.5 ^{bA}	35.2±2.7 ^{aA}	41.6±3.5 ^{aA}	34.5±3.7 ^{aA}	35.2±4.2 ^{aA}
b^*	0	4.1±1.9 ^{aA}	-1.9±1.7 ^{bA}	1.9±0.6 ^{aA}	-1.6±0.4 ^{bA}	-3.8±0.7 ^{bcA}	-6.5±0.4 ^{cA}	-5.3±0.5 ^{cA}	-5.8±0.1 ^{cA}
	30	1.9±0.1 ^{aA}	-1.0±1.0 ^{abcA}	1.6±0.3 ^{abA}	-1.6±0.6 ^{bcdA}	-3.6±0.7 ^{cdA}	-7.1±0.5 ^{efA}	-4.0±3.2 ^{deA}	-8.8±0.7 ^{fB}
Hue	0	71.1±16.5 ^{bA}	334.2±22.2 ^{aA}	43.0±11.3 ^{bA}	333.7±5.7 ^{aA}	352.9±2.3 ^{aA}	350.7±0.5 ^{aA}	348.2±1.0 ^{aA}	350.2±0.6 ^{aA}
	30	43.7±1.9 ^{bB}	344.9±14.5 ^{aA}	38.4±6.6 ^{bA}	329.7±4.7 ^{aA}	354.1±1.6 ^{aA}	350.3±1.2 ^{aA}	353.0±6.2 ^{aA}	345.9±0.5 ^{aA}
ΔE^b	30	3.0±2.4 ^{bc}	3.4±1.5 ^{bc}	1.1±0.5 ^c	2.2±1.0 ^{bc}	5.2±3.8 ^{bc}	8.7±2.3 ^{ab}	13.6±4.6 ^a	4.2±1.5 ^{bc}

^aDiferentes letras a, b, c... para la misma propiedad en el mismo tiempo de almacenamiento son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$). Diferentes letras A y B para la misma película comestible (EF) y la misma propiedad son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$).

9.4. Compuestos funcionales de películas comestibles durante el almacenamiento

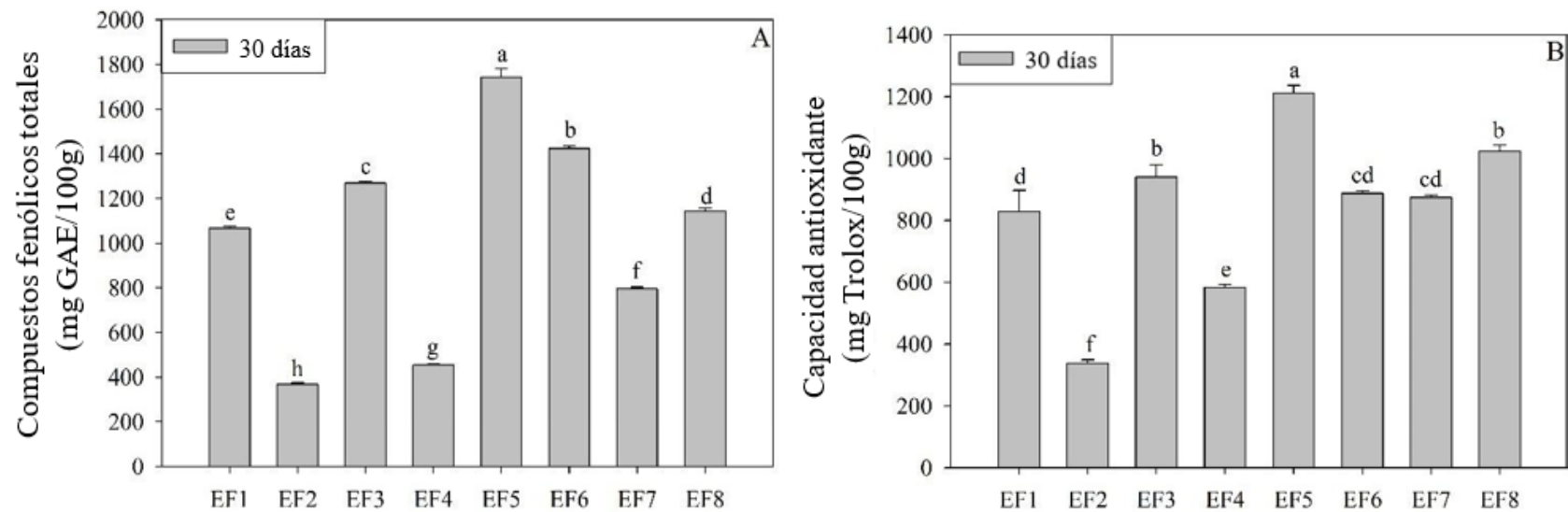


Figura 3. Graficas de resultados para compuestos fenólicos (A) y capacidad antioxidante (B) de las películas comestibles después de 30 días de almacenamiento. Letras diferentes a, b, c, ... indican valores que son estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0.05$).

La Figura 3A y 3B muestran los resultados de las pruebas de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante respectivamente de las películas elaboradas, después de un periodo de 30 días de almacenamiento a 4°C. Al observar ambos resultados nos podemos dar cuenta que los sistemas EF2, EF4 y EF6, cuya formulación contemplaba sueros fermentados por *L. acidophilus* presentaron niveles más bajos de capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales que sus contrapartes no fermentadas (los sistemas EF1, EF3 y EF5). Esto puede tener diferentes causas potenciales:

- pH resultante de la fermentación: *L. acidophilus* genera un medio ácido debido a la producción de ácido láctico durante la fermentación del suero, de acuerdo con Yang et al. (2024), se sugiere que una amplia variedad de los fenoles y flavonoides presentes en la pitahaya son sensibles al pH ácido, lo que da lugar a efectos como la despolimerización, oxidación y a que se generen formas de estos que sean menos detectables por el método de Folin-Ciocalteu, por otro lado en el caso de la capacidad antioxidante el medio ácido afecta puede afectar la capacidad donadora de electrones disminuyendo así la actividad antioxidante de estos compuestos.
- Interacciones con las proteínas del suero lácteo: Según lo reportado por Ozdal et al. (2013), derivado del medio ácido generado a partir de la fermentación se da como resultado un incremento en la interacción de los grupos carboxilos ($-\text{COO}^-$) de compuestos fenólicos y antioxidantes con los amonios primarios ($-\text{NH}_3^+$) de las proteínas del suero lácteo, como es el caso de la β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina, como resultado de estas interacciones la solubilidad de estos compuestos se ve reducida, disminuyendo así las fracciones libres y por ende sus propiedades funcionales, además de que debido al proceso de secado térmico de acuerdo con el trabajo presentado por Nemli et al. (2024), estas interacciones se ven intensificadas debido a la deshidratación y la reorganización de la matriz.
- Actividad enzimática: Según lo indicado por De Montijo-Prieto et al. (2023) la fermentación por bacterias ácido lácticas puede llegar a modificar el perfil de compuestos antioxidantes y fenólicos esto debido a la expresión de enzimas que biotransforman fenoles y flavonoides, en el caso en concreto de *L. acidophilus* por la producción de enzimas como β -glucosidasas, esterasas fenólicas y descarboxilasas, generando productos con propiedades antioxidantes diferentes, pudiendo causar un

aumento o disminución de la capacidad antioxidante total; dichas enzimas, como es sugerido por Kumar et al. (2025), retienen cierta actividad residual incluso después de terminado el proceso de fermentación, pudiendo así seguir causando modificaciones sobre los compuestos fenólicos incluso si la fuente de estos es añadida posteriormente. Estas aseveraciones concuerdan también con lo indicado por Morais et al. (2019), donde se encontró que ciertos compuestos fenólicos como los ácidos cafeico y clorogénico, epicatequina, procianidina, rutina, entre otros presentes en la pitahaya roja se vieron reducidos por el proceso de fermentación.

En lo general se pudo observar que existió una disminución tanto en los compuestos fenólicos como en la capacidad antioxidante en los sistemas fermentados, sin embargo es destacable que al observar los resultados de ambas pruebas en los sistemas 7 y 8, el sistema 8, el cual pasó por proceso de fermentación, presenta niveles más altos de capacidad antioxidante y cuerpos fenólicos totales que su contraparte no fermentada (EF7). Esto sugiere una interacción sinérgica entre todos los componentes de la formulación (probiótico + prebiótico + antioxidante + matriz láctea) que da como resultado un mayor nivel de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante que en los sistemas fermentados incompletos. De acuerdo con Shahidi et al. (2025) la inulina podría no solo actuar como prebiótico si no jugar un papel clave en este efecto sinérgico, puesto que su modificación parcial en el proceso fermentativo favorecería una mayor interacción no covalente con compuestos fenólicos y antioxidantes, interacciones que pueden proteger a estos compuestos de la degradación térmica, mejorar su estabilidad estructural dentro de la matriz y aumentar la disponibilidad de su fracción libre disponible para extracción y detección mediante los métodos de Folin-Ciocalteu y DPPH. Por otro lado Rocchetti et al. (2022) sugiere que el proceso fermentativo puede favorecer una saturación de interacciones no covalentes entre polifenoles y proteínas, generando así que más compuestos antioxidantes libres para su extracción y cuantificación. Finalmente se puede mencionar que se pudo observar que la adición de polvo de pitahaya en las formulaciones dio como resultado un incremento notable y estadísticamente significativo ($p < 0.05$) tanto de compuestos fenólicos (48.5%), como de capacidad antioxidante (61.7%) en las películas comestibles, esto atribuido a la alta capacidad antioxidante de la pitahaya roja.

9.5 Población de *L. acidophilus* en las películas fermentadas

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas microbiológicas se encontró que los componentes en la formulación de las películas comestibles afectaron de manera significativa ($p < 0.05$) la prevalencia de *L. acidophilus* tras el periodo de almacenaje de 30 días, específicamente en el caso de los sistemas EF6 y EF8 las cuales presentaron los conteos más altos del probiótico, estas no presentaron una diferencia estadísticamente significativa entre sí, pero si con respecto de sus contrapartes que no incluyeron polvo de pitahaya en su composición (los sistemas EF2 y EF4), lo cual sugiere que la pitahaya mejora la prevalencia del probiótico tras el almacenamiento. En este sentido existen estudios que sustentan que el incorporar polvo de pitahaya en una matriz alimentaria favorece la supervivencia de microorganismos probióticos, esto debido a la presencia de compuestos funcionales como compuestos fenólicos, antioxidantes y fibra dietética, estos componentes interactúan con la matriz alimentaria y gracias a su capacidad antioxidante generan microambientes favorables para las poblaciones de microorganismos dentro de la matriz confiriéndoles protección del estrés oxidativo generado en el secado térmico y durante el almacenamiento, dando como resultado un aumento en su viabilidad a diferencia de matrices simples (Reyes-García et al. 2024; Saleena et al. 2024). Por otro lado diferentes trabajos refieren que no solo el efecto funcional del polvo de pitahaya jugaría un papel importante en la prevalencia de *L. acidophilus*, si no tambien tener un efecto prebiótico sobre la población bacteriana, en este sentido Bandgar y Bhintade (2024) refieren que la presencia de fibra y carbohidratos complejos puede proveer oligosacáridos que actúen como prebióticos, aun cuando estos no hayan sido fermentados durante la fermentación inicial, lo que podría ayudar a mantener la viabilidad microbiana a lo largo del almacenamiento. De igual modo Pansai et al. (2020) refiere que existen reportes sobre que una fracción de los carbohidratos presentes en la pitahaya (8.6% - 50.01%) son oligosacáridos lo cuales presentan un grado de polimerización de 5 a 7, similar al presentado por la inulina y al de ciertos oligosacáridos conocido por su efecto prebiótico, como son los fructooligosacáridos, galactooligosacáridos y xilooligosacáridos, y que ha mostrado de manera in vitro tener propiedades prebióticas sobre cultivos microbianos. Por otro lado tambien es importante destacar que la inulina también mejora la prevalencia del probiótico, lo cual se ve reflejado en la diferencia estadísticamente significativa existente

entre los demás sistemas con el respecto al sistema control EF2. En este sentido múltiples estudios refieren que el incorporar inulina como fuente prebiótica tiene un efecto protector sobre viabilidad de la población de *Lactobacillus* spp. en películas comestibles, reduciendo la perdida generada por el estrés de almacenamiento frente a películas carentes de prebiótico (Orozco-Parra et al. 2020; Sáez-Orviz et al. 2023). Resulta importante mencionar que todos los sistemas formulados con suero fermentado presentaron un conteo de probióticos superior a 1.18×10^7 UFCs/g, de acuerdo con lo presentado por Hill et al. (2014), estos valores se encuentran por debajo de la dosis recomendada por la ISAPP (Asociación Científica Internacional para Probióticos y Prebióticos), indicando una ingesta diaria recomendada de 10^9 UFC para mayores beneficios a la salud, sin embargo en 2023 el autor refiere que en el caso de películas comestibles, estas se pueden considerar un alimento rico en probióticos de acuerdo con la siguiente escala: bajo $< 10^4$ UFCs/g, medio $10^4 - 10^7$ UFCs/g, y alto $> 10^7$ UFCs/g.

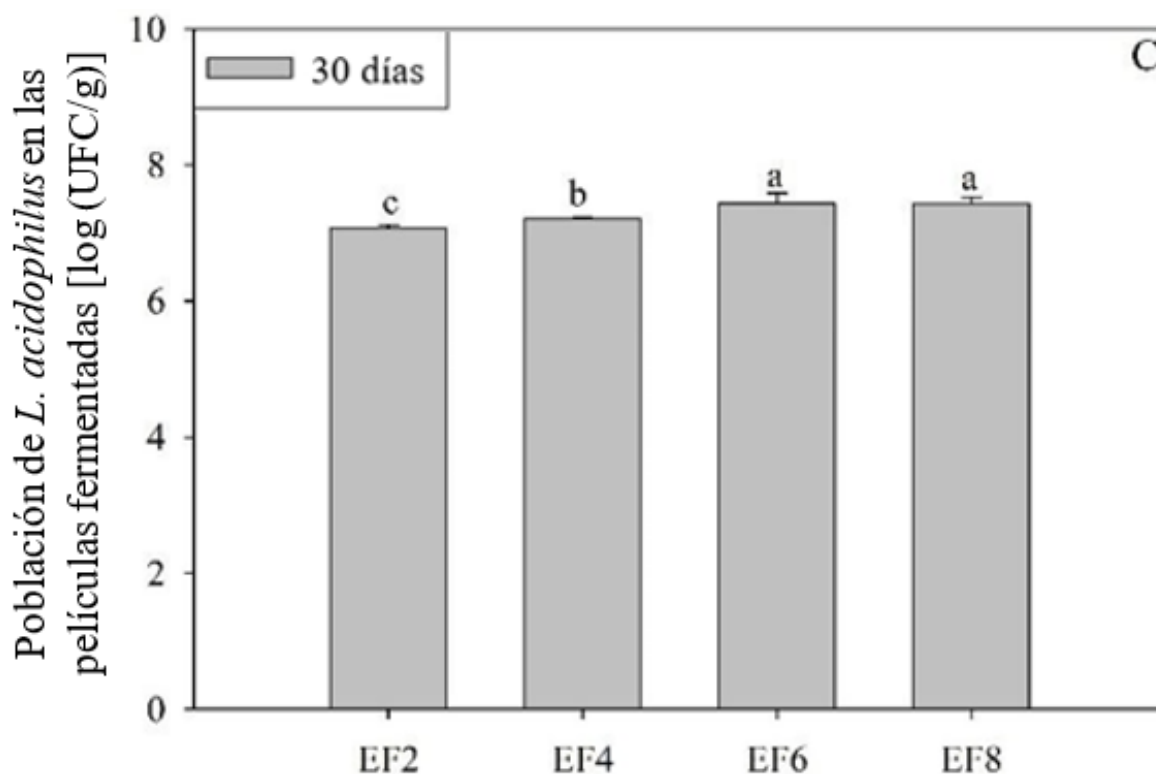


Figura 4. Grafica que muestra los resultados de la prevalencia del probiótico (*L. acidophilus*) tras el periodo de almacenamiento. Letras diferentes a, b, c, ... indican valores que son estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0.05$).

9.6 Pruebas de capacidad antimicrobiana de las películas

En la tabla 11 se muestra la actividad antimicrobiana que presentaron las películas comestibles de los diferentes sistemas con los que se trabajaron frente a *Salmonella typhimurium*, la cual, de acuerdo con el trabajo realizado por Finn et al. es un microorganismo que se puede desarrollar en alimentos que tengan un porcentaje bajo de humedad. La actividad antimicrobiana de los diferentes sistemas se evaluó después de 30 días de almacenamiento, tanto aplicada sobre agar SS, como desprendida, y de acuerdo con el fundamento del agar SS la presencia de una coloración negra es indicativa del crecimiento de *S. typhimurium*. Como se pudo apreciar en la tabla los sistemas con suero de leche no fermentado (blanco) no presentaron ningún tipo de inhibición, viéndose afectada la integridad del disco de película colocado en el agar, desde habiéndose vuelto más blando hasta habiéndose licuado completamente, y al retirar el residuo de película se pudo apreciar que el microorganismo se desarrolló por debajo de la película. Caso contrario ocurrió con las películas formuladas con suero de leche fermentado (rojo), donde el disco de película solo se vio parcialmente afectado en su integridad o no sufrió alteración alguna como en el caso del EF8, asimismo al retirar las películas de la superficie del agar se pudo apreciar que en el sitio donde se colocó el disco, la coloración negra se presentó en menor medida como en el caso de la EF2, o no se presentó en su totalidad, caso de la EF8, indicando que el microorganismo no se llegó a desarrollar. En este sentido los resultados obtenidos en la prueba anterior son congruentes con los resultados encontrados en otros trabajos donde se puso a prueba la inhibición de *S. typhimurium* por parte de *L. acidophilus* contenido en productos lácteos fermentados, caso de lo reportado por Millette et al. (2007), trabajo en el que se encontró que productos fermentados como el yogurt que contienen probióticos en su formulación, como *L. acidophilus*, presentaron la capacidad de inhibir el crecimiento de *S. typhimurium* y comparando su efectividad frente a leche sin fermentar y amoxicilina, donde su capacidad inhibitoria se justifica por el hecho de que microorganismos probióticos como *L. acidophilus* producen sustancias antimicrobianas como bacteriocinas y péptidos antimicrobianos, así como ácido láctico y acético para controlar el desarrollo de patógenos intestinales y así poder competir por sitios de adhesión en el intestino. Asimismo la adición del polvo de pitahaya roja favorece la actividad antimicrobiana propiciada por *L. acidophilus*, tal como lo refiere Yong et al. (2017) donde

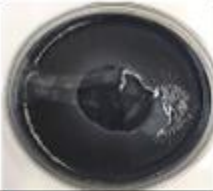
se compara la actividad antimicrobiana de la pitahaya roja y la espinaca roja frente a diferentes bacterias gram positivas y gram negativas, incluyendo *S. typhimurium*, donde se determinó la concentración mínima inhibitoria en diferentes formas de procesamiento de la pitahaya para evitar el crecimiento de diferentes cepas de bacterias, donde la actividad antimicrobiana se asoció a el contenido de betacianinas, las cuales fueron aisladas tanto de la pitahaya roja como de la espinaca roja, mostrando resultados significativos tanto en sus procesamiento aislado como en forma de jugo; resultados que tambien concuerdan con el trabajo de Tenore et al. (2012), donde se reportó que el contenido de betacianinas presentes en la pulpa de pitahaya roja demostró tener una capacidad antimicrobiana significativa contra bacterias gram positivas, negativas, hongos y levaduras, presentando una capacidad mínima inhibitoria de 500 µg/mL.

Adicionalmente, se evaluó el posible efecto del pH en la actividad antimicrobiana de los sistemas fermentados, donde los valores obtenidos oscilaron entre 4.7 y 4.9 (Tabla 8), pero sin presentar una diferencia estadísticamente significativa entre ellos. De acuerdo con la literatura *Salmonella typhimurium*. presenta un crecimiento optimo en pH cercano a la neutralidad de entre 6.5-7.5, ahora bien en un rango de pH entre 5 y 4.5 *Salmonella typhimurium*. comienza a experimentar estrés ácido parcial y disminuyendo su desarrollo pero no frenándolo en su totalidad. (Foster & Hall, 1991) (Keerthirathne et al. 2019). De acuerdo con lo anterior todos los sistemas fermentados presentaron valores compatibles con las condiciones de estrés ácido para *Salmonella typhimurium*, lo cual de acuerdo con la literatura pudo contribuir a la inhibición observada, sin embargo es importante notar que el sistema EF8, que mostró la mayor actividad antimicrobiana, no fue el sistema que presentó el pH más bajo, lo cual sugiere que el efecto inhibitorio no estuvo determinado exclusivamente por el parámetro de pH, el cual de acuerdo con la literatura al rango presentado genera solo una disminución en el desarrollo, y no una inhibición total, sino por la interacción entre la formulación, la presencia de compuestos bioactivos y la actividad y viabilidad del probiótico, la cual fue mayor en el sistema EF8, y aunque la diferencia con el sistema EF6 en este parámetro no fue estadísticamente significativa, si presento una diferencia importante en la inhibición del microorganismo.

Es importante notar que en la prueba de inhibición realizada no se presentó un halo de inhibición como si se presenta en la clásica prueba de difusión de Kirby-Bauer, esto es indicativo que el tipo de inhibición que presentan las películas comestibles fermentadas no es a través de la difusión inmediata de compuestos antimicrobianos, si no mediante contacto directo con el microorganismo, lo cual implica una liberación controlada de los compuestos antimicrobianos conforme la película comestible interactúa con el microorganismo, tal es el caso de los resultados reportados por Punia Bangar et al. (2021), donde se describe que los aditivos antimicrobianos en una película comestible se encuentran encapsulados dentro de la matriz polimérica y que su liberación se da de manera sostenida y controlada sobre la superficie que está en contacto directo con la película comestible, reduciendo así el desarrollo microbiano en el área donde esta se aplica, asimismo, Hernández et al. (2011) reporta información similar, donde menciona que los compuestos antimicrobianos contenidos en las películas comestibles no difunden fácilmente sobre el agar, por lo que la inhibición se limita a la zona donde la película tiene contacto directo.

Por último es importante mencionar que una potencial limitación del método aplicado radica en un falso positivo al crecimiento de *S. typhimurium*, ocasionado por la difusión del sulfuro de hidrogeno dando como resultado zonas con coloración negra en el sitio de aplicación de la película, pero sin un desarrollo real del microorganismo, sin embargo es importante notar que en aquellos sistemas donde aun con la película aplicada se presentó una coloración negra, indicativo del desarrollo *S. typhimurium*, este cambio en la coloración en el sitio de aplicación siempre vino acompañado de un deterioro estructural de la película, deterioro atribuido a la degradación de esta por parte del microorganismo, por lo que aunque posible, en los resultados obtenidos no es factible un falso positivo al crecimiento de *S. typhimurium*, en cuyo caso se habrían presentado zonas con coloración negra en el sitio de aplicación de la película, pero dicha película habría permanecido sin alteraciones en su estructura.

Tabla 11. Actividad antimicrobiana

<i>Salmonella typhimurium</i>					
P. comestible	Aplicada	Desprendida	P. comestible	Aplicada	Desprendida
EF1			EF5		
EF2			EF6		
EF3			EF7		
EF4			EF8		

9.7 Aplicación de película comestible EF8 en dulce de camote mexicano

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico, microbiológico y mecánico de los diferentes sistemas evaluados se seleccionó al sistema 8 para ser aplicado al dulce de camote mexicano. En la Figura 5 se presentan tres imágenes, en la primera se el dulce de camote mexicano recién abierto sin recubrimiento (A), en la segunda se muestra al dulce recién abierto recubierto por la película comestible (B) y en la tercera se muestra el dulce recubierto después de 15 días de almacenamiento en una caja de cartón a temperatura ambiente.

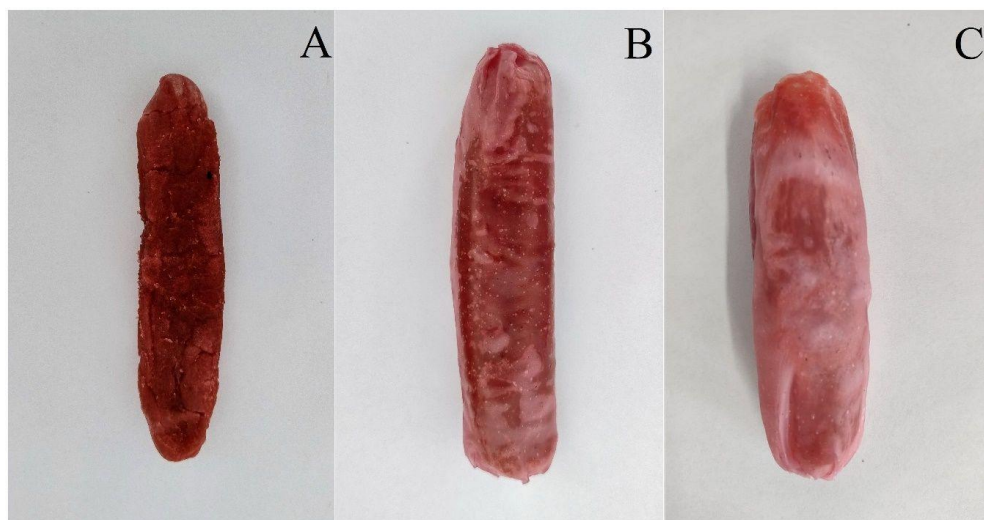


Figura 5. Aplicación del sistema EF8 sobre dulce de camote mexicano

La tabla 12 presenta los resultados de las pruebas de caracterización fisicoquímica, perfil de antioxidantes y compuestos fenólicos, prevalencia probiótica y colorimetría aplicadas al dulce de camote mexicano de fresa sin recubrir, una vez recubierto y transcurrido un periodo de almacenamiento de 15 días a temperatura ambiente. Basado en el análisis estadístico los resultados de las pruebas de humedad (19.5% - 20.9%), pH (4.9%), acidez titulable (0.005% a 0.007%) y el parámetro L^* (31.8% a 33.7%) de la colorimetría no se vieron afectados de manera significativa ($p < 0.05$) por incorporar el recubrimiento con las películas comestibles. Sin embargo los resultados de los parámetros a^* , b^* y el ángulo Hue de la colorimetría, así como los compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y prevalencia de probióticos si demostraron haber sido afectados de manera significativa por la aplicación de las películas comestibles. A continuación se abordarán con más detalle los parámetros que se vieron afectados de manera significativa por la incorporación de las películas comestibles al dulce de camote mexicano después de su elaboración:

- Colorimetría: En el caso de esta prueba al momento de la producción los parámetros a^* , b^* y el ángulo Hue disminuyeron de 24.8 a 11.4, de 7.4 a 1.3 y de 16.8 a 6.6 respectivamente en el dulce de camote recubierto, lo cual indica una ligera tendencia mínima hacia un tono amarillo, sin embargo, de acuerdo con el código de color HEX (#62494E, #723A40), tanto en el dulce recubierto como sin recubrimiento

existe una predominancia de un tono rojizo oscuro, con ciertos matices rosas y color más apagado en el primero, mientras que el segundo presenta el tono rojo oscuro con mayor intensidad y ciertos matices anaranjados.

- Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante: El incorporar las películas comestibles al dulce de camote mexicano resultó en un incremento significativo ($p < 0.05$) de los compuestos funcionales. El aumento se dio de la siguiente manera, en el caso de los compuestos fenólicos hubo un aumento del 124.8% y 98.4% en la capacidad antioxidante con respecto al dulce no recubierto.
- Población probiótica: El recuento de probióticos en el dulce recubierto fue de 4.35×10^6 UFC/g, dado que un dulce recubierto tiene un peso aproximado de 30g (23g de dulce y 7 gramos de película comestible aproximadamente) una persona que consume un dulce recubierto estaría ingiriendo una cantidad superior a 10^8 UFC (1.31×10^8 UFC), por lo que de acuerdo con la clasificación antes mencionada por Hill et al. (2023), se le puede considerar como un alimento con una alta concentración de probióticos.

Posterior a su almacenaje durante 15 días en una caja de cartón como empaque secundario a temperatura ambiente se encontró que los parámetros de humedad, pH, acidez titulable, compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante se mantuvieron constantes, sin sufrir un cambio estadísticamente significativo ($p > 0.05$) en sus valores, esto concuerda con lo reportado en diferentes trabajos en donde alimentos recubiertos con películas comestibles no presentaron cambios significativos en los parámetros evaluados tras el almacenamiento, como es el caso de Guldaz et al. (2010) quienes recubrieron dulces tradicionales turcos con películas comestibles a base de suero lácteo y que después de su almacenamiento no encontraron cambios significativos en el pH, humedad ni la textura. De igual manera Juliyarsi et al. (2024) refiere que tras el almacenaje de caramelos recubiertos con películas comestibles a base de suero lácteo y cúrcuma no se presentaron cambios estadísticamente significativos en el análisis químico proximal. Sin embargo en cuanto a la colorimetría el parámetro b^* si se vio significativamente afectada tras el tiempo de almacenamiento, viéndose reducido de 1.3 a -7.2, lo cual indica que el dulce recubierto paso de tener muy sutiles tonos amarillos a un ligero tono azulado, lo cual es corroborado por el ángulo *Hue* de 326.7, lo cual en la escala CIELab indica una coloración roja oscura

con ciertos tonos entre morados y azulados, lo cual de igual manera se corrobora con su código de color HEX (#625061) el cual corresponde a un tono magenta – morado oscuro con cierta coloración rojiza – grisácea oscura, este cambio de color fue claramente perceptible de acuerdo al valor de cambio de color total de 20.6

De acuerdo con los resultados obtenidos el incorporar las películas comestibles al dulce de camote mexicano mejoró de manera significativa las propiedades funcionales del dulce de camote mexicano, sin embargo el color y por tanto el aspecto del dulce se vio afectado significativamente en especial tras el periodo de almacenamiento, así como también presentando una disminución significativa en la prevalencia del probiótico, no obstante una pieza de dulce de camote mexicano presenta un contenido aproximado de probióticos de 6.9×10^7 UFC, manteniéndose dentro de la clasificación de alimentos altos en contenido de probióticos.

Tabla 12. Pruebas aplicadas en dulce de camote mexicano

Parámetros	Sin recubrir (0 días)	Recién recubierta (0 días)	Recubierta almacenada (15 días)
Humedad (%)	19.5±0.5 _a	20.9±0.0 _a	19.7±0.2 _a
pH	4.9±0.0 _a	4.9±0.0 _b	5.0±0.0 _b
Acidez titulable (% ácido cítrico)	0.01±0.0 _a	0.01±0.0 _a	0.01±0.0 _a
<i>L</i> [*]	31.8±0.5 _b	33.7±0.5 _a	36.5±0.4 _a
<i>a</i> [*]	24.8±3.7 _a	11.4±0.5 _b	11.0±1.3 _b
<i>b</i> [*]	7.4±0.5 _a	1.3±0.3 _b	-7.2±0.3 _b
<i>Hue</i>	16.8±1.4 _b	6.6±1.9 _c	326.7±2.2 _a
ΔE^b	--	14.9±3.2 _a	20.6±2.5 _a
Total de compuestos fenólicos (mg GAE/100 g ^c)	289.5±34.5 _b	651.0±41.0 _a	657.5±41.0 _a
Capacidad antioxidante (mg Trolox/100 g ^c)	236.0±20.7 _b	468.2±23.9 _a	495.0±9.9 _a
Recuento de probióticos (UFC/g ^c)	--	(4.35 ± 0.21) _a ×10 ⁶	(2.30 ± 0.14) _b ×10 ⁶

^aLetras diferentes para el mismo parámetro presentan diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). ^bCambio total de color en el dulce de camote mexicano sin recubrir. ^c gramos de dulce de camote mexicano con o sin recubrir.

En la Figura 6 se presentan los resultados de las pruebas de compresión y penetración que se le aplicaron a los dulces de camote, dichas pruebas se aplicaron tras el periodo de almacenamiento de 15 días, en el caso de la prueba de compresión se obtuvo una fuerza máxima de compresión de 7.24N para el dulce sin recubrir, y de 14.28N para el dulce recubierto, por otro lado en la prueba de penetración se obtuvo una fuerza máxima de penetración de 1.1N para el dulce no recubierto y de 4.08N para el dulce recubierto. En ambos casos la aplicación de la película comestible al dulce de camote mexicano mejoro de manera significativa sus propiedades mecánicas, confiriéndole una mayor firmeza así como mayor resistencia ante la deformación y fracturas. En este sentido estos resultados son coherentes con los encontrados en otras investigaciones que han indicado que la aplicación de un recubrimiento con una base proteica y de polisacáridos mejora la resistencia mecánica de los alimentos recubiertos, tal es el caso de Pires et al. (2024), de acuerdo con su investigación atribuye esta mejora a las fuertes interacciones intermoleculares que existen entre grupos hidroxilos de las cadenas poliméricas, mismas que se ven propiciadas por el tratamiento térmico que reciben las películas comestibles, mejorando las propiedades mecánicas de la red polimérica.

Según los resultados anteriores el recubrir dulces de camote mexicano con películas comestibles a base de suero de leche, almidón de papa, inulina, polvo de pitahaya y probióticos no solo presenta una mejora en las propiedades funcionales del dulce, si no que tambien aporta una mejora significativa a sus propiedades mecánicas, actuando como una barrera física que protege al alimento tanto de forma global como en su superficie haciéndolo más resistente ante la deformación por presión como a sufrir fisuras superficiales.

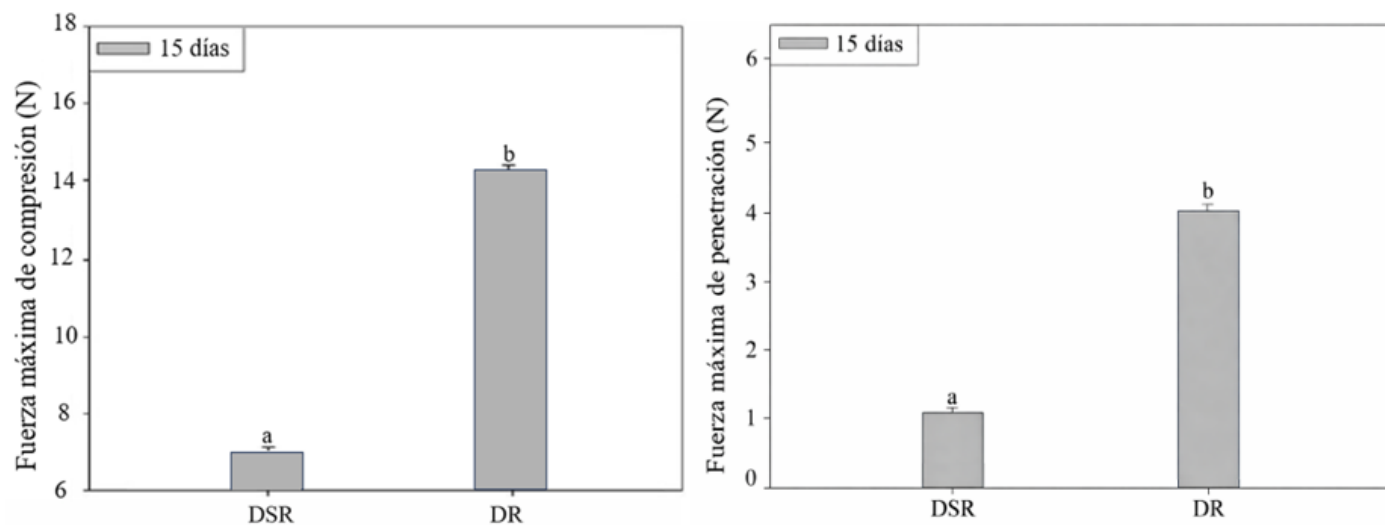


Figura 6. Grafica que muestra los resultados de las pruebas de textura aplicadas al dulce no recubierto y recubierto. Letras diferentes a, b, indican valores que son estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0.05$).

10. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló y caracterizó con éxito una película comestible combiótica a base de pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), *Lactobacillus acidophilus* e inulina.

A partir de la formulación de diferentes soluciones filmogénicas se pudieron generar combinaciones funcionales a partir de las cuales se pueden generar sistemas capaces de mantener estabilidad fisicoquímica, viabilidad probiótica y actividad funcional después del almacenamiento.

Las películas comestibles que se desarrollaron en este estudio presentaron bajo contenido de humedad y estabilidad fisicoquímica durante el periodo de almacenamiento. El proceso de fermentación impacto significativamente los valores de pH y acidez titulable, dejando en evidencia el efecto metabólico de *L. acidophilus*, pero sin llegar a comprometer la estabilidad global de las películas.

En lo que respecta a propiedades mecánicas, las películas mostraron una permeabilidad al vapor de agua relativamente estable así como resistencia suficiente para su función como recubrimientos, aunque ciertamente con valores de fuerza tensil y elongación menores a los reportados para otros sistemas, lo cual esta atribuido principalmente al alto contenido de sólidos de la formulación.

El haber incorporado polvo de pitahaya roja fue un punto determinante en las propiedades colorimétricas, lo que le confirió tonos rosas-purpúreos característicos y relativamente estables en el almacenamiento. En lo que respecta a lo funcional, se pudo observar que los sistemas fermentados presentaron una disminución general en compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, no obstante, el sistema EF8 destacó por presentar un efecto sinérgico entre probiótico, prebiótico y antioxidantes, lo que resultó en niveles superiores de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en comparación con los sistemas no fermentados.

Desde el punto de vista microbiológico las películas demostraron ser una matriz viable para la supervivencia de *L. acidophilus*, alcanzando conteos superiores a 10^7 UFC/g en los sistemas con pitahaya e inulina, además de presentar actividad antimicrobiana frente a

Salmonella typhimurii, lo cual en conjunto confirma el potencial de las películas comestibles como sistemas activos con la capacidad de aportar funcionalidad y seguridad microbiológica.

La aplicación del sistema EF8 al dulce de camote mexicano generó una mejora significativa en sus propiedades funcionales, incrementando el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante del dulce, así como el aporte probiótico, sin afectar los parámetros fisicoquímicos críticos durante el almacenamiento.

El recubrimiento mejoro de manera significativa las propiedades mecánicas del dulce, confiriéndole una mayor firmeza y resistencia ante la compresión y la penetración, contribuyendo a aportar mayor integridad estructural al dulce. Si bien se pudieron observar cambios perceptibles en cuanto a la coloración tras el almacenamiento, el dulce recubierto mantuvo un contenido elevado de probióticos, alcanzando una ingesta superior a los 10^8 UFC por porción permitiendo clasificarlo como un alimento con un alto contenido de probióticos.

En conjunto los resultados obtenidos constatan que las películas comestibles combióticas que se desarrollaron en este trabajo representan una alternativa viable e innovadora para el recubrimiento de alimentos tradicionales, con potencial para mejorar sus propiedades funcionales, mecánicas y microbiológicas, aportando valor agregado al producto sin comprometer su estabilidad.

11. RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos anteriores, para futuras investigaciones resultaría conveniente buscar optimizar la formulación de las películas mediante ajuste del contenido de sólidos y del plastificante con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas así como determinar la actividad de agua de los sistemas.

Se sugiere profundizar en el estudio de las interacciones que pueden presentarse entre las proteínas del suero, polisacáridos y compuestos fenólicos, para comprender los mecanismos que influyen en la estabilidad y funcionalidad del sistema. De igual manera resultaría pertinente evaluar la liberación y biodisponibilidad de los probióticos y compuestos antioxidantes mediante modelos de digestión in vitro así como ampliar los estudios de estabilidad bajo condiciones de almacenamiento prolongado y realizar evaluaciones de vida útil que incluyan análisis fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales, con el fin de determinar su viabilidad para aplicaciones reales. También se sugiere que en investigaciones futuras se lleven a cabo análisis orientados a la identificación, caracterización y cuantificación de los oligosacáridos presentes en la pitahaya, así como realizar ensayos in vitro con el fin de evaluar su potencial efecto prebiótico.

De igual manera sería conveniente ampliar la evaluación de la capacidad de inhibición puesto que los resultados obtenidos en este trabajo fueron de tipo cualitativo e indican que las películas comestibles evaluadas no presentan actividad antimicrobiana por difusión en medio sólido, sino principalmente por contacto directo con el microorganismo, por lo que sería conveniente aplicar ensayos microbiológicos de liberación de compuestos antimicrobianos en caldo para así poder obtener datos cuantitativos de la reducción del desarrollo microbiano asociados a la presencia de las películas comestibles, así como también evaluar la inhibición microbiana ante otras bacterias asociadas a contaminación alimentaria como *Staphylococcus* spp. y *Streptococcus* spp, así como contra bacterias mesófilas aerobias asociadas al deterioro de alimentos para verificar si su presencia puede estar relacionada con la modificación de propiedades fisicoquímicas.

También se sugiere la aplicación de técnicas de microscopía electrónica para poder profundizar en el estudio de las modificaciones microestructurales y reorganización de la

matriz polimérica que conforma a las películas comestibles, que tienen lugar durante el almacenamiento, y su impacto sobre propiedades como la permeabilidad al vapor de agua.

Por último, se recomienda determinar el valor nutricional del sistema EF8 puesto que por la naturaleza de varios de sus componentes podría implicar un aumento importante en el aporte calórico y de carbohidratos así como también se recomienda la aplicación del recubrimiento en otras matrices alimentarias y realizar estudios de factibilidad técnico-económica que consideren tanto los aspectos tecnológicos como los costos asociados a la producción de las películas comestibles, con el fin de evaluar la viabilidad de su producción y aplicación a escala industrial.

12. REFERENCIAS

- Abdul Hakim, B. N., Xuan, N. J., & Oslan, S. N. H. (2023). A comprehensive review of bioactive compounds from lactic acid bacteria: Potential functions as functional food in dietetics and the food industry. *Foods*, 12(15), 2850.
- Afzaal, M., Saeed, F., Hussain, M., Ismail, Z., Siddeeg, A., Ammar, A. F., & Aljobair, M. O. (2022). Influence of encapsulation on the survival of probiotics in food matrix under simulated stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(9), 103394.
- Akinci, Z. K., Karaman, H., Yildirim-Yalcin, M., Olcay, H. S., Inan, M., & Toker, O. S. (2024). Effects of red pepper pomace protein and oil on the properties of starch-based edible films. *Waste and Biomass Valorization*, 15(6), 3579-3588.
- Ali, S. M., Siddique, Y., Mehnaz, S., & Sadiq, M. B. (2023). Extraction and characterization of starch from low-grade potatoes and formulation of gluten-free cookies containing modified potato starch. *Heliyon*, 9(9).
- Altermann, E., Russell, W. M., Azcarate-Peril, M. A., Barrangou, R., Buck, B. L., McAuliffe, O., ... & Klaenhammer, T. R. (2005). Complete genome sequence of the probiotic lactic acid bacterium *Lactobacillus acidophilus* NCFM. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(11), 3906-3912.
- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis. 14a edition. Association of Official Analytical Chemists, Inc. Washington D.C., EUA
- Aparicio-Fernández, X., Vega-Ahuatzin, A., Ochoa-Velasco, C.E., Cid-Pérez, S., Hernández-Carranza, P., Ávila-Sosa, R. (2018). Physical and antioxidant
- Bandgar Rupali, D., & Bhintade Charushila, P. (2024). Medicinal Properties and Nutritional Value of Dragon Fruit. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 7(2). DOI :10.5281/zenodo.10802283
- Bamigbade, G. B., Subhash, A. J., Kamal-Eldin, A., Nyström, L., & Ayyash, M. (2022). An updated review on prebiotics: insights on potentials of food seeds waste as source of potential prebiotics. *Molecules*, 27(18), 5947. doi: 10.3390/molecules27185947

- Bevilacqua, A., Campaniello, D., Speranza, B., Racioppo, A., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2024). An Update on Prebiotics and on Their Health Effects. *Foods*, 13(3), 446.
- Carsono, N., Tumilaar, S. G., Kurnia, D., Latipudin, D., & Satari, M. H. (2022). A review of bioactive compounds and antioxidant activity properties of piper species. *Molecules*, 27(19), 6774.
- Celi-Simbaña, S. S., Andrade-Mora, D. S., Loza-Pavón, S. J., & Bermeo-Sierra, T. I. (2023). Microplásticos, un problema de salud pública emergente. *Revista Información Científica*, 102.
- Cherbut, C. (2002). Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S159-S162.
- D'Amelia, V., Aversano, R., Chiaiese, P., & Carputo, D. (2018). The antioxidant properties of plant flavonoids: their exploitation by molecular plant breeding. *Phytochemistry Reviews*, 17, 611-625.
- da Motta, A. D. S., Nespolo, C. R., & Breyer, G. M. (2022). Probiotics in milk and dairy foods. In *Probiotics* (pp. 103-128). Academic Press.
- De Luna, S. R., Ramirez-Garza, R. E., & Saldivar, S. S. (2020). Review Article—Environmentally Friendly Methods for Flavonoid Extraction from Plant Material: Impact of Their Operating Conditions on Yield and Antioxidant Properties. *The Scientific World Journal*, 2020.
- De Montijo-Prieto, S., Razola-Díaz, M. D. C., Barbieri, F., Tabanelli, G., Gardini, F., Jiménez-Valera, M., ... & Gómez-Caravaca, A. M. (2023). Impact of lactic acid bacteria fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity of avocado leaf extracts. *Antioxidants*, 12(2), 298.
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo, J. A., & Voilley, A. (1998). Edible films and coatings: tomorrow's packagings: a review. *Critical Reviews in food science*, 38(4), 299-313.
- Deiman S.A. de C.V. (2025). *Glicerina vegetal* (Ref. 7925) [Ficha técnica]. <https://deiman.com.mx/products/nutritional/glicerina>

- Dias, M. C., Pinto, D. C., & Silva, A. M. (2021). Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26(17), 5377.
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. *Foods*, 10(2), 249.
- Doeun, D., Davaatseren, M., & Chung, M. S. (2017). Biogenic amines in foods. *Food science and biotechnology*, 26(6), 1463-1474.
- Ebrahimi, B., Mohammadi, R., Rouhi, M., Mortazavian, A. M., Shojaee-Aliabadi, S., & Koushki, M. R. (2018). Survival of probiotic bacteria in carboxymethyl cellulose-based edible film and assessment of quality parameters. *Lwt*, 87, 54-60.
- Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., & Adjallé, K. (2023). A review of the effect of plasticizers on the physical and mechanical properties of alginate-based films. *Molecules*, 28(18), 6637.
- Fatima, S., Khan, M. R., Ahmad, I., & Sadiq, M. B. (2024). Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review. *Heliyon*, 10(6).
- Feiner, G. (2006). The microbiology of specific bacteria. En Elsevier eBooks (pp. 595-615).
- Fematt-Flores, G. E., Aguiló-Aguayo, I., Marcos, B., Camargo-Olivas, B. A., Sánchez-Vega, R., Soto-Caballero, M. C., ... & Rodríguez-Roque, M. J. (2022). Milk protein-based edible films: Influence on mechanical, hydrodynamic, optical and antioxidant properties. *Coatings*, 12(2), 196.
- Fenster, K., Freeburg, B., Hollard, C., Wong, C., Rønhave Laursen, R., & Ouwehand, A. C. (2019). The production and delivery of probiotics: A review of a practical approach. *Microorganisms*, 7(3), 83.
- Foster, J. W., & Hall, H. K. (1991). Inducible pH homeostasis and the acid tolerance response of *Salmonella typhimurium*. *Journal of bacteriology*, 173(16), 5129-5135.
- Fu, J., Alee, M., Yang, M., Liu, H., Li, Y., Li, Z., & Yu, L. (2022). Synergizing multi-plasticizers for a starch-based edible film. *Foods*, 11(20), 3254.

- Ganguly, S., Sabikhi, L., & Singh, A. K. (2019). Effect of whey-pearl millet-barley based probiotic beverage on Shigella-induced pathogenicity in murine model. *Journal of Functional Foods*, 54, 498-505.
- Gao, H., Li, X., Chen, X., Hai, D., Wei, C., Zhang, L., & Li, P. (2022). The functional roles of *Lactobacillus acidophilus* in different physiological and pathological processes. *Journal of microbiology and biotechnology*, 32(10), 1226.
- García-Argueta, I., Dublán-García, O., Quintero-Salazar, B., Dominguez-Lopez, A., Gómez-Oliván, L. M., & Salem, A. F. Z. (2013). Effect of lactic acid bacteria on the textural properties of an edible film based on whey, inulin and gelatin. *African Journal of Biotechnology*, 12(19).
- Gentile, L. (2020). Protein–polysaccharide interactions and aggregates in food formulations. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 48, 18-27.
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., ... & Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 14(8), 491-502.
- Gibson, G. R., & Roberfroid, M. B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *The Journal of nutrition*, 125(6), 1401-1412.
- Guldas, M., Bayizit, A. A., Yilsay, T. O., & Yilmaz, L. (2010). Effects of edible film coatings on shelf-life of mustafakemalpasa sweet, a cheese based dessert. *Journal of food science and technology*, 47(5), 476-481.
- Hafnimardiyanti, H., & Armin, M. I. (2016). Effect of plasticizer on physical and mechanical characteristics of edible film from mocaf flour. *Der Phamacia Lettre*, 8(19), 301-308.
- Hallsworth, J. E. (2022). Water is a preservative of microbes. *Microbial Biotechnology*, 15(1), 191-214.

- Hernández-Carranza, P., Fierro-Corona, G., Tapia-Maruri, D., Ruiz-Martínez, I., Ávila-Reyes, S. V., Ruiz-López, I. I., & Ochoa-Velasco, C. E. (2023). Bioactive edible films based on lab-fermented whey solution and potato starch: Characterization and storage behavior. *Food and Bioprocess Technology*, 16(12), 3045-3056.
- Hernández-Carranza, P., Mendoza-Gutiérrez, B. A., Estévez-Sánchez, K. H., Ramírez-López, C., Beristain-Bauza, S. D. C., Avila-Reyes, S. V., ... & Ochoa-Velasco, C. E. (2024). Development and Application of Bioactive Bi-Layer Edible Films Based on Starch and LAB-Fermented Whey and/or Mango Solution. *Fermentation*, 10(2), 105. <https://doi.org/10.3390/fermentation10020105>
- Hernández-Ochoa, L., Gonzales-Gonzales, A., Gutiérrez-Mendez, N., Muñoz-Castellanos, L. N., & Quintero-Ramos, A. (2011). Estudio de la actividad antibacteriana de películas elaboradas con quitosano a diferentes pesos moleculares incorporando aceites esenciales y extractos de especias como agentes antimicrobianos. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 455-463.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., ... & Sanders, M. E. (2014). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 11(8), 506-514. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66>
- Hill, C., Tancredi, D. J., Cifelli, C. J., Slavin, J. L., Gahche, J., Marco, M. L., ... & Sanders, M. E. (2023). Positive health outcomes associated with live microbe intake from foods, including fermented foods, assessed using the NHANES database. *The Journal of Nutrition*, 153(4), 1143-1149. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.02.019>
- HiPP. (2024). *HiPP Scientific Services*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2024, de HiPP ORGANIC COMBIOTIC: https://hcp.hipp.com/products/hipp-milk-formulae/combiotic/?utm_source=chatgpt.com
- Huda, A. R., Kee, Y. S., Wong, K., Zakaria, L., & Mohd, M. H. (2021). Diaporthe species causing stem gray blight of red-fleshed dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) in Malaysia. *Scientific Reports*, 11(1).

- Jimenez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Edible and biodegradable starch films: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2058-2076.
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 302-310.
- Juliyarsi, I., Melia, S., Setiawan, R. D., Sukma, A., Wulandari, A., & Anggraini, T. (2024, May). Application of edible film whey with Curcuma domestica Val extract to caramel candy: Storage time and temperature study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1341, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.
- Keerthirathne, T. P., Ross, K., Fallowfield, H., & Whiley, H. (2019). The combined effect of pH and temperature on the survival of Salmonella enterica serovar typhimurium and implications for the preparation of raw egg mayonnaise. *Pathogens*, 8(4), 218.
- Kiokias, S., Proestos, C., & Oreopoulou, V. (2020). Phenolic acids of plant origin—A review on their antioxidant activity in vitro (o/w emulsion systems) along with their in vivo health biochemical properties. *Foods*, 9(4), 534.
- Konstantinidi, M., & Koutelidakis, A. E. (2019). Functional foods and bioactive compounds: A review of its possible role on weight management and obesity's metabolic consequences. *Medicines*, 6(3), 94.
- Kurek, M., Benaida-Debbache, N., Elez Garofulić, I., Galić, K., Avallone, S., Voilley, A., & Waché, Y. (2022). Antioxidants and bioactive compounds in food: Critical review of issues and prospects. *Antioxidants*, 11(4), 742.
- Laali, K. K., Greves, W. J., Correa-Smits, S. J., Zwarycz, A. T., Bunge, S. D., Borosky, G. L., ... & Chanan-Khan, A. (2018). Novel fluorinated curcuminoids and their pyrazole and isoxazole derivatives: Synthesis, structural studies, Computational/Docking and in-vitro bioassay. *Journal of Fluorine Chemistry*, 206, 82-98.
- Lara-Fiallos, M., Lara-Gordillo, P., Julián-Ricardo, M. C., Pérez-Martínez, A., & Benítez-Cortés, I. (2017). Avances en la producción de inulina. *Tecnología Química*, 37(2), 352-366.

- Latif, A., Shehzad, A., Niazi, S., Zahid, A., Ashraf, W., Iqbal, M. W., ... & Korma, S. A. (2023). Probiotics: Mechanism of action, health benefits and their application in food industries. *Frontiers in microbiology*, 14, 1216674.
- Lee, J. S., Lee, E. S., & Han, J. (2020). Enhancement of the water-resistance properties of an edible film prepared from mung bean starch via the incorporation of sunflower seed oil. *Scientific reports*, 10(1), 13622.
- Liang, H., Zhang, Y., Miao, Z., Cheng, R., Jiang, F., Ze, X., ... & He, F. (2022). Anti-allergic effects of two potential probiotic strains isolated from infant feces in China. *Journal of Functional Foods*, 92, 105070.
- Lin, D., Xiao, M., Zhao, J., Li, Z., Xing, B., Li, X., ... & Chen, S. (2016). An overview of plant phenolic compounds and their importance in human nutrition and management of type 2 diabetes. *Molecules*, 21(10), 1374.
- Macías-González, A., Hernández-Carranza, P., Ruiz-López, I. I., & Ochoa-Velasco, C. E. (2024). Using LAB-fermented whey for developing bioactive edible films based on purple sweet potato flour/potato starch. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(4), 2632-2646.
- Mantzourani, I., Nouska, C., Terpou, A., Alexopoulos, A., Bezirtzoglou, E., Panayiotidis, M. I., ... & Plessas, S. (2018). Production of a novel functional fruit beverage consisting of cornelian cherry juice and probiotic bacteria. *Antioxidants*, 7(11), 163.
- Millette, M., Luquet, F. M., & Lacroix, M. (2007). In vitro growth control of selected pathogens by *Lactobacillus acidophilus*-and *Lactobacillus casei*-fermented milk. *Letters in applied microbiology*, 44(3), 314-319.
- Min, M., Bunt, C. R., Máson, S. L., & Hussain, M. A. (2019). Non-dairy probiotic food products: An emerging group of functional foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(16), 2626-2641.
- Miranda, R. F., de Paula, M. M., da Costa, G. M., Barão, C. E., da Silva, A. C. R., Raices, R. S. L., ... & Pimentel, T. C. (2019). Orange juice added with *L. casei*: is there an

impact of the probiotic addition methodology on the quality parameters?. *Lwt*, 106, 186-193.

Mirzakulova, A., Sarsembaeva, T., Suleimenova, Z., Kowalski, Ł., Gajdzik, B., Wolniak, R., & Bembenek, M. (2025). Whey: Composition, Processing, Application, and Prospects in Functional and Nutritional Beverages—A Review. *Foods*, 14(18), 3245.

Moharram, H. A., & Youssef, M. M. (2014). Methods for determining the antioxidant activity: a review. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, 11(1), 31-42.

Morais, S. G. G., Borges, G. D. S. C., dos Santos Lima, M., Martín-Belloso, O., & Magnani, M. (2019). Effects of probiotics on the content and bioaccessibility of phenolic compounds in red pitaya pulp. *Food research international*, 126, 108681.

Mora-Sánchez, M., Hernández-Carranza, P., Ramírez-López, C., Ruiz-López, I. I., & Ochoa-Velasco, C. E. (2023). Developing active chitosan-based edible film for extending the shelf life of guacamole. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1254337.

Muncke, J. (2021). Tackling the toxics in plastics packaging. *PLoS Biology*, 19(3), e3000961. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000961>

Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2020). *Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials*. *Materials*, 13(21), 4994. doi:10.3390/ma13214994

Nemli, E., Ozkan, G., Gultekin Subasi, B., Cavdar, H., Lorenzo, J. M., Zhao, C., & Capanoglu, E. (2024). Interactions between proteins and phenolics: Effects of food processing on the content and digestibility of phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(5), 2535-2550.

Orozco-Parra, J., Mejía, C. M., & Villa, C. C. (2020). Development of a bioactive synbiotic edible film based on cassava starch, inulin, and *Lactobacillus casei*. *Food Hydrocolloids*, 104, 105754.

- Ozdal, T., Capanoglu, E., & Altay, F. (2013). A review on protein–phenolic interactions and associated changes. *Food Research International*, 51(2), 954-970.
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: an overview. *Journal of nutritional science*, 5, e47.
- Pansai, N., Chakree, K., Takahashi Yupanqui, C., Raungrut, P., Yanyiam, N., & Wichienchot, S. (2020). Gut microbiota modulation and immune boosting properties of prebiotic dragon fruit oligosaccharides. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 55-64.
- Parra, R. A. (2010). *Bacterias ácido lácticas: papel funcional en los alimentos*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 8 (1), 93-105.
- Pavli, F., Kovaïou, I., Apostolakopoulou, G., Kapetanakou, A., Skandamis, P., Nychas, G. J. E., ... & Chorianopoulos, N. (2017). Alginate-based edible films delivering probiotic bacteria to sliced ham pretreated with high pressure processing. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(9), 1867.
- Pavli, F., Tassou, C., Nychas, G. J. E., & Chorianopoulos, N. (2018). Probiotic incorporation in edible films and coatings: Bioactive solution for functional foods. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 150.
- Petkoska, A. T., Daniloski, D., D'Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International*, 140, 109981.
- Petruzzello, C., Saviano, A., & Ojetti, V. (2023). Probiotics, the immune response and acute appendicitis: a review. *Vaccines*, 11(7), 1170.
- Pires, A. F., Díaz, O., Cobos, A., & Pereira, C. D. (2024). A review of recent developments in edible films and coatings-focus on whey-based materials. *Foods*, 13(16), 2638.
- Pizzorno, J. (2024). Plastic Food Container Safety. *Integrative Medicine: A Clinician's Journal*, 23(2), 6.

- Plaza-Diaz, J., Ruiz-Ojeda, F. J., Gil-Campos, M., & Gil, A. (2019). Mechanisms of action of probiotics. *Advances in nutrition*, 10, S49-S66.
- Pramitasari, R., Gunawicahya, L. N., & Anugrah, D. S. B. (2022). Development of an indicator film based on cassava starch–chitosan incorporated with red dragon fruit peel anthocyanin extract. *Polymers*, 14(19), 4142.
- Punia Bangar, S., Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Kumar, M., & Trif, M. (2021). Natural antimicrobials as additives for edible food packaging applications: A review. *Foods*, 10(10), 2282.
- Reyes-García, V., Botella-Martínez, C., Juárez-Trujillo, N., Muñoz-Tébar, N., & Viuda-Martos, M. (2024). Pitahaya (*Hylocereus ocamponis*)-peel and-flesh flour obtained from fruit co-products—assessment of chemical, techno-functional and in vitro antioxidant properties. *Molecules*, 29(10), 2241.
- Roberfroid, M. (2007). Prebiotics: the concept revisited¹. *The Journal of nutrition*, 137(3), 830S-837S.
- Rocchetti, G., Gregorio, R. P., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Oliveira, P. G., Prieto, M. A., ... & Lucini, L. (2022). Functional implications of bound phenolic compounds and phenolics–food interaction: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 811-842.
- Saleena, L. A. K., Kumaran, D., How, Y. H., & Pui, L. P. (2024). Probiotic-edible film in active packaging with antimicrobial effect and storage viability: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(10), 7704-7715.
- Samaniego, F., Sosa del Castillo, R. (2006). *Lactobacillus* spp. Importantes promotores de actividad probiótica, antimicrobiana y bioconservadora. Centro de Estudios Biotecnológicos. Facultad de Agronomía. Universidad de matanzas “Camilo Cienfuegos”.

- Samanta, S. (2022). Potential impacts of prebiotics and probiotics on cancer prevention. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 22(4), 605-628.
- Sáez-Orviz, S., Rendueles, M., & Diaz, M. (2023). Impact of adding prebiotics and probiotics on the characteristics of edible films and coatings-a review. *Food Research International*, 164, 112381.
- Secretaría de Economía & Secretaría de Salud. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4010/seeco11_C/seeco11_C.htm
- Shah, K., Chen, J., Chen, J., & Qin, Y. (2023). Pitaya nutrition, biology, and biotechnology: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 13986.
- Shahidi, F., & Athiyappan, K. D. (2025). Polyphenol-polysaccharide interactions: molecular mechanisms and potential applications in food systems—a comprehensive review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 7(1), 42.
- Sharma, S., Mohler, J., Mahajan, S. D., Schwartz, S. A., Bruggemann, L., & Aalinkeel, R. (2023). Microbial biofilm: a review on formation, infection, antibiotic resistance, control measures, and innovative treatment. *Microorganisms*, 11(6), 1614.
- Shoaib, M., Shehzad, A., Omar, M., Rakha, A., Raza, H., Sharif, H. R., ... & Niazi, S. (2016). Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate polymers*, 147, 444-454.
- Singh, A., Gu, Y., Castellarin, S. D., Kitts, D. D., & Pratap-Singh, A. (2020). Development and characterization of the edible packaging films incorporated with blueberry pomace. *Foods*, 9(11), 1599.
- Taghvaei, M., & Jafari, S. M. (2015). Application and stability of natural antioxidants in edible oils in order to substitute synthetic additives. *Journal of food science and technology*, 52, 1272-1282.

- Teneva-Angelova, T., Hristova, I., Pavlov, A., & Beshkova, D. (2018). Lactic acid bacteria—from nature through food to health. In *Advances in Biotechnology for Food Industry* (pp. 91-133). Academic Press.
- Tenore, G. C., Novellino, E., & Basile, A. (2012). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of functional foods*, 4(1), 129-136.
- Teodoro, A. J. (2019). Bioactive compounds of food: their role in the prevention and treatment of diseases. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2019. doi: 10.1155/2019/3765986
- Thakkar, P. N., Modi, H. A., & Prajapati, J. (2016). Therapeutic Impacts of Probiotics--as Magic Bullet. *American Journal of Biomedical Sciences*, 8(2).
- Vasile, C., & Baican, M. (2021). *Progresses in Food Packaging, Food Quality, and Safety—Controlled-Release Antioxidant and/or Antimicrobial Packaging*. *Molecules*, 26(5), 1263. doi:10.3390/molecules26051263
- Verona, A., Urcia, J., & Paucar, L. M. (2020). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): Culture, physicochemical characteristics, nutritional composition, and bioactive compounds. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 439-453.
- Verti, S (2001). *Solo para Florivoros ¿Las Flores se comen?*. México: Panorama.
- Weiss, J. F., & Landauer, M. R. (2003). Protection against ionizing radiation by antioxidant nutrients and phytochemicals. *Toxicology*, 189(1-2), 1-20.
- Yadav, A. K., & Singh, S. V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 51(9), 1654-1673.
- Yang, X., Hong, J., Wang, L., Cai, C., Mo, H., Wang, J., ... & Liao, Z. (2024). Effect of lactic acid bacteria fermentation on plant-based products. *Fermentation*, 10(1), 48.
- Yáñez, K. C. (2008). *Estudio de la calidad y elaboración de la tabla de contenido nutrimental del dulce de camote (Ipomoea batatas) de Puebla* (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

- Yong, Y. Y., Dykes, G., Lee, S. M., & Choo, W. S. (2017). Comparative study of betacyanin profile and antimicrobial activity of red pitahaya (*Hylocereus polyrhizus*) and red spinach (*Amaranthus dubius*). *Plant foods for human nutrition*, 72, 41-47.
- Zambrano, M. V., Dutta, B., Mercer, D. G., MacLean, H. L., & Touchie, M. F. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 484-496.
- Zhang, L., Taal, M. A., Boom, R. M., Chen, X. D., & Schutyser, M. A. (2018). Effect of baking conditions and storage on the viability of *Lactobacillus plantarum* supplemented to bread. *Lwt*, 87, 318-325.