



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“EFECTO DE UNA PELÍCULA ELECTROHILADA DE PROTEÍNA DE
AMARANTO CON EXTRACTO DE JAMAICA SOBRE LA CALIDAD Y
VIDA ÚTIL DE PRODUCTOS CÁRNICOS”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
ALIMENTOS

PRESENTA:

IBT. ABEL MIRANDA ROQUE

DIRIGIDO POR:

DRA. SANDRA OLIMPIA MENDOZA DÍAZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO; MAYO, 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

“Efecto de una película electrohilada de proteína de amaranto con extracto de jamaica sobre la calidad y vida útil de productos cárnicos”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Presenta:

IBT. Abel Miranda Roque

Dirigido por:

Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz

Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz

Presidente

Dra. Montserrat Hernández Iturriaga

Secretario

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Vocal

Dra. Karen Magaly Soto Martínez

Suplente

Dr. Carlos Hernán Herrera Méndez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Mayo, 2022.

México.

DEDICATORIA

“Agradezco a Dios por permitirme estar presente el día de hoy y haber terminado mi maestría en alimentos. Dedico esta tesis a mi familia, principalmente a mis padres quienes me dieron la vida, educación, apoyo y prácticamente todo lo que tengo, los quiero mucho. También, a mis hermanos que siempre me han apoyado en cualquier aspecto, les agradezco todo su esfuerzo. Gracias”.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de Querétaro** por haberme dado una excelente formación dentro de su posgrado de maestría.

Al **CONACYT** por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

A mi director de tesis, la **Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz** por la confianza puesta en mí y por permitirme haber trabajado en su grupo de trabajo. Es una gran persona y un ejemplo a seguir, de los mejores profesores que he tenido.

A mis **miembros de comité**, Dra. Karen Magaly Soto Martínez, Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña, Dra. Montserrat Hernández Iturriaga y Dr. Carlos Hernán Herrera Méndez por las observaciones pertinentes realizadas a este proyecto. Especialmente a la Dra. Montserrat que me brindó su apoyo y retroalimentación en varios aspectos, siempre con una actitud positiva.

A mi **familia**, por todo el esfuerzo que ha hecho cada uno de ellos para apoyarme, por la educación que me dieron y por ayudarme a tomar siempre las mejores decisiones.

A el **Dr. Ramón Román Doval** por los conocimientos enseñados acerca del electrohilado y por siempre estar en disposición de ayudarme.

A mi amigo **Daniel Mendoza García** por siempre estar ahí cuando lo necesito, muchas cosas hemos pasado juntos desde que nos conocimos y ahora un logro más, terminamos la maestría. Eres mi mejor amigo y una persona importante para mí, gracias por tu apoyo amigo.

A mi amiga **Ana Arceo Tirado** por su amistad que me vine a encontrar en esta maestría, eres una gran persona. Gracias por tu amistad y apoyo en estos años, y por las buenas pláticas y risas en el laboratorio. Eres mi mejor amiga y doy gracias por haberte conocido amix.

A mi amigo **Pedro López** por haberlo conocido en esta maestría. Me ayudaste en otros aspectos amigo y siempre voy a estar agradecido con eso, eres uno de mis mejores amigos.

A mi amigo **Alejandro** otra gran persona que conocí en esta maestría. Buenas pláticas que teníamos en la escuela, y también agradecerte por los consejos que me dabas para mi proyecto. También eres uno de mis mejores amigos.

A el **Dr. Juan Reséndiz** por el apoyo mostrado a mi proyecto a lo largo de mi maestría, una gran persona.

A mis **compañeros de laboratorio** Carmen, Adolfo y Raquel porqué siempre estuvieron en disposición de ayudarme en cualquier aspecto, y en algunas técnicas me apoyaron, se los agradezco.

A todos mis **profesores** que he tenido durante todo este proceso, gracias por enseñarme y transmitirme parte de su conocimiento. De cada uno aprendí bastante y se los agradezco.

A mis **compañeros de generación** porqué fue un gusto coincidir con ustedes y compartir estos años, y sobre todo a aquellos que me ayudaron en mi proyecto.

A **Fernanda Hernández** porqué ha sido una persona muy linda conmigo y me agrada bastante, además de que sé que cuento con ella para cualquier cosa, aunque a veces me diga de cosas. Te has ganado un lugar en mi corazón, muchas gracias por ser así, estoy muy feliz de haberte conocido, te quiero mucho.

ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1 Propiedades y características del amaranto. | 3 |
| 2.1.1 Historia y cultivo..... | 3 |
| 2.1.2 Semillas. | 4 |
| 2.1.3 Características nutricionales..... | 5 |
| 2.1.4 Películas y/o fibras a base de amaranto. | 8 |
| 2.2 Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L). | 11 |
| 2.2.1 Distribución, cultivo y morfología. | 12 |
| 2.2.2 Características nutricionales..... | 13 |
| 2.2.3 Propiedades de la jamaica..... | 15 |
| 2.3 Electrohilado | 16 |
| 2.3.1 Fundamento y características..... | 17 |
| 2.3.2 Componentes del proceso de electrohilado..... | 17 |
| 2.3.3 Parámetros importantes que afectan el proceso. | 18 |
| 2.3.4 Polímeros de interés empleados en el electrohilado..... | 19 |
| 2.3.5 Aplicación de nanofibras en alimentos..... | 20 |
| 2.4 Carne y productos cárnicos | 21 |
| 2.4.1 Principales factores de deterioro..... | 22 |
| 2.4.2 Sector cárnico en México..... | 23 |
| 2.4.3 Clasificación de los productos cárnicos | 23 |
| 2.4.4 Trabajos relacionados a la conservación de productos cárnicos..... | 24 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 32 |
| IV. HIPÓTESIS | 33 |
| V. OBJETIVOS | 34 |
| VI. MATERIALES Y MÉTODOS | 35 |
| 6.1 Materiales | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.1 Reactivos | 35 |
| 6.2 Obtención y caracterización de los extractos fenólicos de jamaica. | 35 |
| 6.2.1 Obtención del extracto fenólico..... | 35 |
| 6.2.2 Determinación de compuestos fenólicos totales. | 36 |
| 6.2.3 Capacidad antioxidante mediante DPPH..... | 36 |
| 6.2.4 Capacidad antioxidante mediante ABTS. | 36 |
| 6.2.5 Determinación de la actividad antimicrobiana de los extractos..... | 37 |
| 6.3 Preparación de reactivos para las soluciones poliméricas. | 37 |
| 6.3.1 Preparación del aislado proteico de amaranto (APA) al 5 %. | 37 |
| 6.3.2 Preparación de polivinil alcohol (PVA) al 7.5 %. | 37 |
| 6.3.3 Preparación de butilhidroxitolueno (BHT) al 1%. | 38 |
| 6.4 Preparación y caracterización de las soluciones poliméricas y electrohilado..... | 38 |
| 6.4.1 Componentes de las soluciones poliméricas | 38 |
| 6.4.2 Determinación de pH. | 39 |
| 6.4.3 Determinación de conductividad eléctrica..... | 39 |
| 6.4.4 Determinación de viscosidad. | 39 |
| 6.4.5 Técnica de electrohilado | 40 |
| 6.5 Caracterización de las películas..... | 41 |
| 6.5.1 Determinación de espesor. | 41 |
| 6.5.2 Determinación del contenido de humedad..... | 41 |
| 6.5.3 Determinación de color. | 42 |
| 6.5.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM). | 42 |
| 6.5.5 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). | 42 |
| 6.5.6 Actividad antimicrobiana. | 42 |
| 6.6 Incorporación de la película a un producto cárnico. | 43 |
| 6.6.1 Determinación de pH. | 44 |
| 6.6.2 Determinación de color. | 44 |
| 6.6.3 Determinación de TBARS..... | 45 |
| 6.6.4 Análisis microbiológico..... | 45 |
| 6.7 Análisis estadístico..... | 46 |

| | |
|--|----|
| VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 7.1 Extractos de jamaica. | 47 |
| 7.1.1 Compuestos fenólicos totales. | 47 |
| 7.1.2 Capacidad antioxidante por DPPH y ABTS. | 48 |
| 7.1.3 Actividad antimicrobiana de los extractos. | 49 |
| 7.2 Caracterización de las soluciones poliméricas. | 50 |
| 7.3 Caracterización de las películas obtenidas por electrohilado. | 53 |
| 7.3.1 Apariencia física de las películas. | 53 |
| 7.3.2 Espesor..... | 53 |
| 7.3.3 Contenido de humedad..... | 54 |
| 7.3.4 Color | 56 |
| 7.3.5 Caracterización microscópica. | 57 |
| 7.3.6 Espectroscopía infrarroja. | 61 |
| 7.3.7 Actividad antimicrobiana. | 63 |
| 7.4 Efecto de la película sobre un producto cárnico. | 65 |
| VIII. CONCLUSIONES | 76 |
| IX. BIBLIOGRAFÍA | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Planta de amaranto..... | 3 |
| Figura 2. Semillas de amaranto..... | 5 |
| Figura 3. Flor de jamaica..... | 11 |
| Figura 4. Estructura química de antocianinas presentes en jamaica. | 14 |
| Figura 5. Proceso de electrohilado (Shin <i>et al.</i> , 2012)..... | 17 |
| Figura 6. Componentes del proceso de electrohilado. | 18 |
| Figura 7. Carne. | 22 |
| Figura 8. De izquierda a derecha: jamaica roja y jamaica blanca. | 35 |
| Figura 9. Soluciones poliméricas empleadas, de izquierda a derecha: control, jamaica blanca, jamaica roja y BHT. | 39 |
| Figura 10. Medición de viscosidad. | 40 |
| Figura 11. Sistema de electrohilado. | 41 |
| Figura 12. Cortes de chuleta ahumada de cerdo empleados para la determinación de pH, color y TBARS. | 43 |
| Figura 13. Cortes de chuleta ahumada de cerdo para el análisis microbiológico.. | 43 |
| Figura 14. Charolas con los cortes de chuleta ahumada de cerdo con las películas correspondientes para almacenar en refrigeración. | 44 |
| Figura 15. Películas obtenidas por electrohilado: 1) película control, 2) película de jamaica blanca, 3) película de jamaica roja y 4) película de BHT. | 53 |
| Figura 16. Color base de las películas obtenidas por electrohilado. | 56 |
| Figura 17. Microscopías de SEM: A) película control a 1000X, B) película control a 5000X, C) película de jamaica blanca a 1000X, D) película de jamaica blanca a 5000X, E) película de jamaica roja a 1000X, F) película de jamaica roja a 5000X, G) película de BHT a 1000X y H) película de BHT a 5000X. | 58 |
| Figura 18. Histogramas del diámetro de las fibras: a) película control, b) película de jamaica blanca, c) película de jamaica roja y d) película de BHT..... | 59 |
| Figura 19. Histogramas del diámetro de los bits: a) película control, b) película de jamaica blanca, c) película de jamaica roja y d) película de BHT..... | 60 |
| Figura 20. Espectro de infrarrojo de las películas obtenidas por electrohilado. APA: aislado proteico de amaranto, PVA: polivinil alcohol, EX JR: extracto de jamaica roja, EX JB: extracto de jamaica blanca, PE CON: película control, PE JB: película de jamaica blanca, PE JR: película de jamaica roja, PE BHT: película de BHT.... | 62 |
| Figura 21. Efecto de las películas sobre el pH de la chuleta ahumada de cerdo durante el almacenamiento a 4 °C. PE CO: película control, PE JR: película de jamaica roja, PE JB: película de jamaica blanca, PE BHT: película de BHT y CSP: carne sin película. | 66 |
| Figura 22. Apariencia de la chuleta con las películas del día inicial (izquierda) y final (derecha) de evaluación. | 69 |

Figura 23. Color base de la chuleta ahumada de cerdo con las películas de cada tratamiento. 70

Figura 24. Efecto de las películas sobre TBARS en las chuletas de cerdo: PE CO: película control, PE JR: película de jamaica roja, PE JB: película de jamaica blanca, PE BHT: película de BHT y CSP: carne sin película..... 71

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 1. Composición proximal de cereales y del amaranto (Huerta et al., 2012). . | 6 |
| Tabla 2. Composición de aminoácidos esenciales en el amaranto (Huerta et al, 2012)..... | 7 |
| Tabla 3. Efecto de algunas variables en las fibras electrohiladas. | 19 |
| Tabla 4. Contenido de fenoles totales de los extractos de jamaica..... | 47 |
| Tabla 5. Capacidad antioxidante de los extractos de jamaica..... | 48 |
| Tabla 6. Halos de inhibición de los extractos contra diferentes bacterias. | 49 |
| Tabla 7. pH de las soluciones poliméricas. | 51 |
| Tabla 8. Conductividad eléctrica de las soluciones poliméricas. | 51 |
| Tabla 9. Viscosidad de las soluciones poliméricas..... | 52 |
| Tabla 10. Espesor de las películas..... | 54 |
| Tabla 11. Contenido de humedad de las películas..... | 55 |
| Tabla 12. Parámetros de color de las películas..... | 56 |
| Tabla 13. Actividad antimicrobiana de las películas. | 64 |
| Tabla 14. pH de la carne con las películas durante el almacenamiento a 4 °C..... | 66 |
| Tabla 15. Parámetros de color de la carne con las películas durante el almacenamiento 4 °C. | 68 |
| Tabla 16. Valores de TBARS (mg MDA/kg carne) de la carne durante el tiempo de almacenamiento. | 71 |
| Tabla 17. Sobrevivencia de <i>L. sakei</i> y <i>L. monocytogenes</i> en chuleta ahumada de cerdo (log UFC/g)..... | 74 |

RESUMEN

Tradicionalmente, la industria de cárnicos emplea diferentes tipos de antioxidantes químicos para controlar el grado de deterioro de sus productos, sin embargo, su uso está limitado a ciertas concentraciones. El objetivo del presente estudio fue generar una película electrohilada de proteína de amaranto con extractos de jamaica para observar el efecto en parámetros de calidad de un producto cárnico. Se obtuvieron extractos etanol/agua de dos variedades de jamaica (roja y blanca) determinando la concentración de fenoles totales, capacidad antioxidante por 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y ácido 2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico (ABTS), y actividad antimicrobiana. Se establecieron las condiciones experimentales para la obtención de las películas electrohiladas (flujo: 0.5 ml/h, voltaje: 23 kV, distancia: 15 cm, temperatura: 23-26 °C, humedad: 25-45 %) y se caracterizaron determinando el espesor, color, contenido de humedad, morfología y tamaño mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y actividad antimicrobiana. Por último, se evaluó el efecto de las películas sobre atributos de calidad de chuleta ahumada de cerdo durante 12 días de almacenamiento midiendo pH (6-8.49), color, sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) y su capacidad antimicrobiana contra *Lactobacillus sakei* y *Listeria monocytogenes*. La película con extracto de jamaica blanca presentó un rango de 2.15-10.59 mg malondialdehído/kg carne logrando disminuir en un 11.5 % la oxidación de lípidos de la chuleta ahumada de cerdo, además de que las películas presentaron diferencias significativas en la evaluación antimicrobiana durante el almacenamiento. Por lo tanto, el uso de películas electrohiladas con extracto de jamaica puede representar una alternativa viable para ayudar a mantener la calidad y alargar la vida útil de los productos cárnicos.

Palabras clave: Amaranto, *H. sabdariffa* L., electrohilado, película, conservación de carne.

SUMMARY

Traditionally, the meat industry uses different types of chemical antioxidants to control the degree of spoilage of its products, however, this is limited to certain concentrations. The objective of the present study was the obtention of an electrospun film of amaranth protein with hibiscus extracts to observe the effect on quality parameters of a meat product. Ethanol/water extracts of two varieties of hibiscus (red and white) were obtained and the concentration of total phenols, antioxidant capacity by 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazolin)-6-sulfonic acid (ABTS), and antimicrobial activity were assayed. The experimental conditions were established to obtain electrospun films (flow: 0.5 ml/h, voltage: 23 kV, distance: 15 cm, temperature: 23-26 °C, humidity: 25-45 %) which were characterized by determining the thickness, color, moisture content, morphology and size by scanning electron microscopy (SEM), Fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR) and antimicrobial activity. Finally, the effect of the films on quality attributes of smoked pork chop during 12 days of storage was evaluated by measuring pH (6-8.49), color, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) and their antimicrobial capacity against *Lactobacillus sakei* and *Listeria monocytogenes*. The film with white hibiscus extract presented a range of 2.15-10.59 mg malondialdehyde/kg meat, reducing the lipid oxidation of the smoked pork chop by 11.5 %, in addition to the fact that the films showed significant differences in the antimicrobial evaluation during the storage. Therefore, the use of electrospun films with hibiscus extract may represent a viable alternative to help maintain quality and extend the shelf life of meat products.

Key words: Amaranth, *H. sabdariffa* L., electrospinning, film, meat preservation.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética, y que incluí los detalles metodológicos necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Abel Miranda Roque', is centered on the page.

Abel Miranda Roque

Nombre y firma del estudiante

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al compendio estadístico 2021 del Consejo Mexicano de la Carne, en nuestro país la carne de mayor consumo es la de pollo, seguida de la de porcino y bovino. México constituye el 3.3 % del consumo mundial de carne siendo el sexto consumidor más importante con aproximadamente de 8.8 millones de toneladas de carne consumidas al año (Comecarne, 2021). El consumo anual de carne en México asciende aproximadamente a 65 kg por persona, cifra menor a lo estimado en países ricos donde es alrededor de 100 kg. La carne y los productos cárnicos tienen varias manipulaciones antes de llegar al consumidor; por lo cual se debe elegir correctamente el método de preservación. Dentro de los métodos más comunes para empacar las carnes y derivados se tiene el empaçado permeable al aire, atmósferas modificadas y vacío (Reséndiz-Cruz *et al.*, 2013).

Los materiales que comúnmente se utilizan en el empaçado de productos cárnicos son poliméricos con buenas propiedades de barrera para el oxígeno, por ejemplo: poliamidas, polipropileno y polietileno, que tienen efecto de barrera contra la humedad y además ofrecen buenas características de sellado (Pettersen *et al.*, 2004); el polietileno de baja densidad y el cloruro de polivinilo son los plásticos que más se emplean aunque algunas veces se utiliza el poliestireno.

La industria cárnica ha tenido la necesidad de investigar nuevos materiales de empaques y aditivos naturales que coadyuven a la extensión de la vida útil de sus productos, para disminuir el uso de compuestos químicos los cuales son limitados por cuestiones de seguridad alimentaria. Se han utilizado principalmente aceites esenciales y extractos de distintas plantas, ya que pueden ayudar a combatir los problemas de rancidez y desarrollo de microorganismos.

La seguridad alimentaria junto con las preferencias de los consumidores ha sido un impulso para la evolución del concepto de envase activo. El envasado activo es una tecnología novedosa en la que el material de envasado, el producto alimenticio y el medio ambiente interactúan entre sí para mejorar la vida útil del producto sin

comprometer su calidad ni sus atributos organolépticos (Bhargava *et al.*, 2020; Gaikwad *et al.*, 2019).

Se ha implementado nuevas técnicas para generar recubrimientos y/o películas para los alimentos de origen animal. La técnica de electrohilado es un proceso que produce fibras poliméricas continuas con diámetros en el rango submicrométrico mediante la acción de un campo eléctrico externo impuesto sobre una solución polimérica. Esta técnica se ha aplicado para encapsular antioxidantes (López-Rubio y Lagaron, 2012) y bacterias probióticas (López-Rubio *et al.*, 2012), además de que se ha utilizado para obtener fibras o películas que puedan emplearse como posible empaque para alimentos.

El propósito de este trabajo es generar una película a base de proteína de amaranto empleando la técnica de electrohilado con extracto de jamaica para analizar el efecto de la película en relación a la calidad de un producto cárnico.

II. ANTECEDENTES

2.1 Propiedades y características del amaranto.

2.1.1 Historia y cultivo.

El amaranto (Figura 1) ha sido cultivado en América Latina desde hace más de 7 000 años, el cual proviene de dos palabras griegas cuyo significado es "inmortal" y "no marchitado". A esta planta se le conoce en otros países como icapachaqui o quinoa de valle (Argentina), kiwicha, (Perú), trigo-inca, o cola de zorra (Alemania). El amaranto es una dicotiledónea de la familia *Amaranthaceae*, que pertenece al género *Amaranthus*. Abarca aproximadamente 70 especies, siendo 40 nativas del continente americano. *A. caudatus* L., *A. hypochondriacus* L. y *A. cruentus* L. son especies que han tenido un fuerte desarrollo en varias regiones del mundo debido al alto valor nutrimental (Luis *et al.*, 2018).



Figura 1. Planta de amaranto.

El amaranto es considerado como un pseudocereal que se cultiva principalmente por sus semillas, que son una fuente de harina y aceite. Su crecimiento es rápido y puede usarse en sistemas de rotación de cultivos de granos. Se ha vuelto popular entre los consumidores debido a sus posibles propiedades medicinales (Chmelík *et al.*, 2019).

Se cultivan principalmente tres especies de amaranto: *Amaranthus cruentus* L., especie que se usa para producción de grano, siendo originaria de América Central

cultivándose en el sureste de México. *Amaranthus caudatus* es la segunda especie que se cultiva, ya que se puede producir a bajas temperaturas en comparación con las demás especies, debido a que es originaria de los Andes (Espitia-Rangel *et al.*, 2010). Por último, se encuentra *Amaranthus hypochondriacus* que se cultivaba desde los aztecas y se encuentra ampliamente distribuida en México (Espitia-Rangel *et al.*, 2010). Sus tallos alcanzan un tamaño aproximado de 2.5 m de altura y posee tanto granos como hojas de un alto valor nutritivo.

El cultivo del amaranto se ha extendido en todo el mundo produciéndose en los cinco continentes. Los principales países productores de amaranto son China, India, Kenia, Nepal, México, Perú, Bolivia, Estados Unidos, Argentina, Pakistán, Nepal y Rusia (Morales *et al.*, 2009). Las zonas de producción y cultivo de amaranto en México se encuentran principalmente en el estado de Puebla, siendo este el mayor productor con el 51 % de la producción total nacional. Le siguen los estados de Morelos y Tlaxcala, así como el estado de México y Guanajuato con el 22,18, 6 y 2 %, respectivamente (Cortés, 2016). Debido a sus características nutricionales, el uso más habitual del amaranto es para consumo humano; el grano es utilizado principalmente en México para la elaboración artesanal del dulce conocido como “alegría”.

2.1.2 Semillas.

Las semillas del amaranto (Figura 2) tienen un diámetro (1-1.5 mm) teniendo una forma lenticular y un peso por semilla de 0.6-1.3 mg (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010). El almidón es el elemento principal de la semilla constituyendo cerca del 50 a 60 % de peso seco. El almidón del amaranto tiene dos características: presenta características aglutinantes no usuales y el tamaño de la molécula es demasiado pequeño.



Figura 2. Semillas de amaranto.

Las semillas de amaranto poseen cantidades importantes de polifenoles, los cuales ayudan a combatir enfermedades crónico-degenerativas. Se ha señalado que el consumo de amaranto induce una reducción en los niveles de glucosa y un aumento en los niveles de insulina en suero (ratas diabéticas). Se ha demostrado que la semilla y el concentrado de proteína de amaranto logran reducir los niveles de colesterol hepático y sérico (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010).

2.1.3 Características nutricionales.

La característica más significativa del amaranto es su valor nutritivo, por lo cual la composición química del grano depende de la especie y variedad, así como de las condiciones climáticas. Las semillas y hojas de amaranto tienen un mayor valor nutricional que otros cereales (Chmelík *et al.*, 2019). Los análisis bromatológicos de la composición de las harinas de semillas de amaranto muestran que el contenido de proteína se encuentra de 13 a 18 %, grasa de 6.3 a 8.1 %, fibra de 2.2 a 5.8 % y cenizas de 2.8 a 4.4 % (Huerta-Ocampo y Barba de la Rosa, 2012).

La composición química de las semillas presenta un valor nutrimental superior comparado con otros granos (Tabla 1). Contiene grandes cantidades de almidón, lo cual representa el 50 a 60 % de su peso seco y lípidos de 7 a 8 %. Asimismo, el 14-18 % de las proteínas en las semillas corresponden a globulinas ricas en lisina y aminoácidos azufrados.

Tabla 1. Composición proximal de cereales y del amaranto (Huerta *et al.*, 2012).

| Componente | Amaranto | Maíz | Arroz | Trigo |
|-------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|
| Carbohidratos | 57 | 67.7 | 75.4 | 66.9 |
| Proteína | 17.9 | 10.3 | 8.5 | 14 |
| Humedad | 11.1 | 13.8 | 11.7 | 12.5 |
| Grasa | 7.7 | 4.5 | 2.1 | 2.1 |
| Cenizas | 4.1 | 1.4 | 1.4 | 1.9 |
| Fibra | 2.2 | 2.3 | 0.9 | 2.6 |

Porcentaje en base de peso seco

Además, las semillas contienen diversos compuestos como péptidos antimicrobianos, inhibidores de proteasas, lectinas y compuestos antioxidantes. Distinto autores han mencionado que las proteínas del amaranto contienen diversos péptidos con actividades antihipertensivas y anticancerígenas (Edwards *et al.*, 2007; Sani *et al.*, 2004). En la tabla 2 se presentan los aminoácidos que contiene las principales especies de amaranto.

Tabla 2. Composición de aminoácidos esenciales en el amaranto (Huerta *et al*, 2012).

| Aminoácido (g/100g de proteína) | <i>A. caudatus</i> | <i>A. cruentus</i> | <i>A. hypochondriacus</i> |
|--|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Cisteína | 2.3 | 2.9 | 3 |
| Isoleucina | 3.8 | 5.2 | 3.3 |
| Leucina | 6.1 | 5.3 | 5.4 |
| Lisina | 6.1 | 5.3 | 4.6 |
| Metionina | 2.9 | 1.7 | 1.4 |
| Fenilalanina | 3.7 | 3.8 | 4.1 |

Valores en g/100 g de proteína

El amaranto está clasificado entre las fuentes más importantes de escualeno en el reino vegetal. El aceite de amaranto contiene del 6 al 8 % de escualeno, mientras que las semillas de amaranto contienen aproximadamente el 7 %. El escualeno desempeña papeles importantes en muchos procesos biológicos, como la biosíntesis de esteroides o la coenzima Q10 y también es una parte importante de las membranas celulares. Las propiedades antioxidantes del escualeno se han demostrado en un modelo de peroxidación lipídica de los liposomas, mientras que las propiedades antidiabéticas del escualeno se probaron mediante la medición de la inhibición de la α -amilasa (Conforti *et al.*, 2005).

Los esteroides son otro grupo de sustancias que pueden contribuir al efecto hipolipidémico del amaranto. El esteroide más común contenido en el amaranto es el espinasterol (50 %), el omega-7-estigmasterol (15 %), el omega-7-ergosterol (14 %) y el 24-metileno cicloartenol (10 %). Los componentes lipídicos de la semilla de amaranto contienen ácidos grasos insaturados y saturados con un predominio significativo de ácidos grasos insaturados, incluidos el ácido linoleico, oleico y α -linoleico (Chmelík *et al.*, 2019). La proporción de ácidos grasos saturados a insaturados es aproximadamente 1:3. El ácido graso más abundante en el aceite de amaranto es el ácido linoleico esencial, que comprende aproximadamente el 40 %

de todos los ácidos grasos. El segundo más alto en el aceite es el ácido oleico (aproximadamente 20 %). Los ácidos grasos saturados (ácido palmítico y esteárico) se encuentran en el aceite de amaranto en niveles bajos.

La fibra es un componente importante de la dieta que ayuda con el buen funcionamiento del tracto digestivo. Debido a que la fibra puede afectar la absorción de colesterol del tracto digestivo, se considera otro posible componente que contribuye al efecto hipolipidémico del amaranto, siendo la fibra de amaranto de alta calidad.

2.1.4 Películas y/o fibras a base de amaranto.

El uso de biopolímeros para el desarrollo de películas comestibles y/o biodegradables es una oportunidad de aumentar sus aplicaciones y contribuir con la disminución de la contaminación ambiental provocada por el plástico sintético. Se han utilizado para preparar películas y recubrimientos comestibles que prometen usos innovadores en la protección y conservación de alimentos (Fernández Valdés *et al.*, 2015).

Los polímeros que contiene el amaranto se han utilizado para preparar películas comestibles o biodegradables, directamente a partir de harina, almidón y proteínas, o mezclados con lípidos (Tapia-Blácido *et al.*, 2007; Tapia-Blácido *et al.*, 2005) que podrían usarse en aplicaciones específicas, especialmente aquellas de corta vida útil, como el envasado de alimentos o usos agrícolas (derivados de petróleo) (Song y Zheng, 2014).

En particular, la harina preparada a partir de granos de *Amaranthus caudatus* y *cruentus* tiene un contenido significativo de almidón, proteína y lípidos. Además, esta harina presenta una buena capacidad de formación de película y produce películas con solubilidad moderada, alta flexibilidad y excelentes propiedades de barrera contra el vapor de agua (Tapia-Blácido *et al.*, 2010). El equilibrio entre la concentración de biopolímeros y lípidos y su interacción natural explica las características de dicha harina y evita la separación de fases. Sin embargo, el

principal inconveniente que presentan es que sus propiedades mecánicas son escasas en comparación con las de los polímeros sintéticos.

Varios estudios sugieren que los derivados de amaranto en grano representan ingredientes interesantes para formulaciones de alimentos y materiales promisorios para el desarrollo de películas comestibles y/o biodegradables (Elizondo *et al.*, 2009; Colla *et al.*, 2006). Por ejemplo, se han producido películas de harina de amaranto con interesantes características mecánicas y de barrera de vapor de agua que luego se atribuyeron a las interacciones formadas entre sus polímeros (almidón y proteínas) y lípidos, a la distribución de estas interacciones dentro de la matriz de la película y a las concentraciones naturales de cada componente en la película (Tapia-Blácido *et al.*, 2007).

Soto *et al.* (2019) prepararon nanofibras de aislado de proteína de amaranto (API) cargado de nisina-pululano (API-PUL) mediante el método de electrohilado. La cinética de liberación de nisina se evaluó a pH 3.4 y 6.1 y se valuó la efectividad antimicrobiana de las fibras electrohiladas en jugo de manzana y queso fresco. La encapsulación de nisina en fibras electrohiladas permitió una actividad bactericida completa contra *Salmonella* Typhimurium, *L. monocytogenes* y *Leuconostoc mesenteroides* inoculados en jugo de manzana después de 48, 20 y 48 horas, respectivamente. Cuando se aplicaron fibras de nisina API-PUL al queso fresco, la inactivación de microorganismos se completó después de 142, 120 y 170 horas, respectivamente. Los resultados demostraron que las fibras de nisina API-PUL electrohiladas reducen significativamente la población bacteriana y pueden usarse en productos alimenticios para la seguridad microbiológica.

Las estructuras ultrafinas de API se han desarrollado utilizando la técnica de electrohilado. Aceituno-Medina *et al.* (2013) estudiaron los efectos del pH, el tipo de disolvente y la adición de surfactante sobre la capacidad de hilatura, morfología y organización molecular de estas estructuras. Las morfologías de la cápsula sólo se obtuvieron a valores de pH extremos. La adición de 20 % en peso de Tween 80 mejoró considerablemente la formación de estructuras similares a cápsulas a partir

de la solución de ácido fórmico, ya que este tensioactivo contribuyó a la formación de estructuras alfa helicoidales.

Blanco-Padilla *et al.* (2015) trabajaron con fibras electrohiladas ultrafinas de dos mezclas diferentes de aislado de proteína de amaranto y pululano, las cuales se cargaron con dos concentraciones de curcumina. Las fibras electrohiladas cargadas se caracterizaron fisicoquímicamente y se evaluó el perfil de liberación de curcumina y su capacidad antioxidante en condiciones de digestión *in vitro*. Las eficiencias de encapsulación de la curcumina variaron entre 73-93 % tanto para las cargas como para las composiciones de fibra. La actividad antioxidante de la curcumina atrapada dentro de las fibras ultrafinas se mantuvo después del proceso de digestión *in vitro* y fue superior en comparación con el compuesto bioactivo no encapsulado.

El API del grano de *Amaranthus hypochondriacus*, ha sido electrohilado en fibras mediante la mezcla con pululano, para encapsular ácido fólico. Las nanofibras de API/pululano aumentan la estabilidad térmica y UV del ácido fólico, revelando el potencial de las fibras electrohiladas para proteger las vitaminas fotosensibles (Aceituno-Medina *et al.*, 2014).

Aceituno-Medina *et al.* (2015) encapsularon dos compuestos bioactivos, quercetina y ácido ferúlico, utilizando la técnica de electrohilado dentro del aislado de proteína híbrida de amaranto: fibras ultrafinas de pululano. Se evaluó la morfología y la estabilidad térmica de las estructuras de encapsulación desarrolladas, así como la eficiencia y distribución de la encapsulación dentro de las fibras de ambos compuestos. Se investigaron las características de liberación y la capacidad de protección de las estructuras de encapsulación durante un estudio de digestión *in vitro*. Se obtuvieron fibras electrohiladas ultrafinas lisas en las que los antioxidantes se distribuyeron homogéneamente.

Soto *et al.* (2016) desarrollaron un portador de nisina. Las nanofibras de proteína de amaranto y pululano (50:50) cargadas con nisina se obtuvieron por electrohilado. Se evaluó la eficiencia de carga de nisina, así como la actividad antimicrobiana contra los *Leuconostoc mesenteroides*. El proceso de electrohilado mejoró las propiedades térmicas de la mezcla polimérica desplazando el pico T_m a

temperaturas más altas y aumentando la cristalinidad. Los resultados presentaron una perspectiva para el uso potencial de nanofibras de amaranto de proteínas al incorporar antimicrobianos como estrategia de conservación de alimentos.

2.2 Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L).

La jamaica es una planta que crece en países subtropicales y se ha utilizado en diferentes tipos de alimentos (Figura 3). Es una planta rica en fitoquímicos como polifenoles, especialmente antocianinas, polisacáridos y ácidos orgánicos, la cual tiene una enorme posibilidad de usos terapéuticos modernos (Riaz y Chopra, 2018). Contiene varios compuestos, incluidos ácidos orgánicos (como cítrico, ascórbico, oxálico, málico, tartárico, hibisco y ácido hidroxícitrico), antocianinas (como antocianidina, gossipianina e hibisco), polisacáridos (como glucosa, arabinosa, galactosa y ramnosa) y flavonoides (como quercetina, luteolina, hibiscitrina, sabdaritrina, gossipitrina y gositrina) (Sindi *et al.*, 2014). Se utiliza en las industrias farmacéutica y alimentaria (Da-Costa-Rocha *et al.*, 2014) siendo una planta de fácil cultivo ideal para los países en desarrollo, de la cual se pueden aprovechar sus diferentes compuestos para obtener algún beneficio.



Figura 3. Flor de jamaica.

2.2.1 Distribución, cultivo y morfología.

El género *Hibiscus* incluye más de 300 especies de hierbas anuales o perennes, arbustos o árboles (Wang *et al.*, 2012). Su distribución nativa es incierta, algunos creen que es de India o Arabia Saudita (Ismail *et al.*, 2008), mientras que Murdock mostró evidencia de que *Hibiscus sabdariffa* fue domesticado por las poblaciones negras del oeste de Sudán (África) en algún momento antes del 4 000 A.C. Se cultiva ampliamente en regiones tropicales y subtropicales incluyendo India, Arabia Saudita, China, Malasia, Indonesia, Filipinas, Vietnam, Sudán, Egipto, Nigeria y México (Eslaminejad y Zakaria, 2011; Ismail *et al.*, 2008).

Hibiscus sabdariffa L. es un subarbolito herbáceo anual, erecto, tupido, que puede crecer hasta 8 pies (2.4 m) de altura, con tallos lisos o casi lisos, cilíndricos, típicamente rojos. Las hojas son alternas, de 3 a 5 pulgadas (7.5-12.5 cm) de largo, verdes con venas rojizas y pecíolos largos o cortos. Las hojas de las plántulas jóvenes y superiores son simples; las hojas inferiores son lobuladas (3 a 5 e inclusive 7) y los márgenes dentados. Las flores miden hasta 5 pulgadas (12.5 cm) de ancho, siendo de color amarillo o granate y se vuelven rosadas al marchitarse. El cáliz es normalmente rojo y se compone de 5 sépalos con un collar de 8 a 12 brácteas afiladas (o bracteoles) delgadas cerca de la base, comienza a agrandarse, se vuelve carnoso, crujiente pero jugoso, 3.2-5.7 cm de largo y encierra completamente la cápsula aterciopelada, 1.25-2 cm de largo, que es verde cuando es inmadura, con 5 válvulas suaves de 3-5 mm de largo. La cápsula se vuelve marrón y se abre cuando está madura y seca. El cáliz, los tallos y las hojas son ácidos (Ross, 2003).

Hibiscus sabdariffa L. es fácil de cultivar en la mayoría de los suelos bien drenados, pero puede tolerar suelos pobres. Requiere un crecimiento de 4 a 8 meses con temperaturas nocturnas con un mínimo de 20 °C, así como 13 h de luz solar durante los primeros meses para evitar la floración prematura. La lluvia o la alta humedad durante el tiempo de producción y el proceso de secado logran disminuir la calidad de los cálices lo cual afecta el rendimiento. La calidad de *Hibiscus sabdariffa* L. está determinada por el stock de semillas, las condiciones locales de cultivo, el tiempo

de cosecha, el manejo posterior a la cosecha y el paso de secado. La mayoría de las veces crece como un suplemento de cultivo y es susceptible a los hongos, ataques virales, bacterianos e insectos. Una sola planta produce aproximadamente 1.5 kg de fruta, aproximadamente 8 t/ha. Los rendimientos de las hojas pueden ser de aproximadamente 10 t/ha (EcoCrop, 2007; Plotto, 2004).

2.2.2 Características nutricionales.

Los cálices de *Hibiscus sabdariffa* L. son ricos en carbohidratos, fibra dietética, proteínas, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos (Aurelio *et al.*, 2008). Un estudio sobre el análisis nutricional de la planta de jamaica por Luvonga *et al.* (2010) destacó que el contenido de carbohidratos (68.7 %) fue el más alto seguido por la fibra cruda (14.6 %) y el contenido de cenizas (12.2 %). En otro estudio, Abou-Arab *et al.* (2011) informaron la composición próxima de los cálices de jamaica en peso seco, que contienen proteínas (7.51 %), grasas (0.46 %) carbohidratos (69.62 %), fibra (11.17 %) y cenizas (11.24 %). Recientemente, Jabeur *et al.*, (2017) informaron por primera vez la presencia de glucosa (6.5 g/100 g), fructosa y ácidos grasos en *Hibiscus sabdariffa*. También revelaron que los carbohidratos (87 ± 1 g/100 g de peso seco) eran los macronutrientes más abundantes, seguidos de las proteínas (5.5 g/100 g) y las grasas (0.47 g/100 g). Sin embargo, Sáyago-Ayerdi *et al.* (2007) informaron que la flor de jamaica contenía fibra dietética como el componente más grande (33.9 %) que es rico en compuestos insolubles (85.6 %) y fibra dietética soluble (SDF) era el 14.4 % del contenido total de fibra dietética (DF). Este SDF está asociado con polifenoles que presentan actividad antioxidante produciendo así un efecto saludable en el colon.

Se ha encontrado que los cálices de jamaica son ricos en vitaminas como niacina, riboflavina y el ácido ascórbico. La niacina y piridoxina están presentes en una cantidad apreciable en los cálices de *Hibiscus sabdariffa* (Luvonga *et al.*, 2010). Los tocoferoles α y β también están presentes en la jamaica, siendo la isoforma α (39.19 mg/100 g) la más abundante (Jabeur *et al.*, 2017). También se encuentra gran cantidad de minerales, especialmente calcio, hierro, potasio y magnesio. Varios trabajadores informaron diferentes valores de cenizas y contenido mineral (Ojokoh,

2006). Carvajal-Zarrabal *et al.* (2012) sugirieron que estas diferencias en el valor se debían al tipo de suelo que influía en el contenido de cenizas y minerales dentro de la misma especie.

Los cálices de jamaica son ricos en polifenoles, especialmente en antocianinas como delphinidina-3-sambubiósido y cianidina-3-sambubiósido (figura 4), que son antioxidantes fuertemente hidrófilos (Fernández-Arroyo *et al.*, 2011). Tsai *et al.* (2002) han informado que el 85 % de las antocianinas es delphinidina-3-sambubiósido y es la principal fuente de capacidad antioxidante del extracto de jamaica.

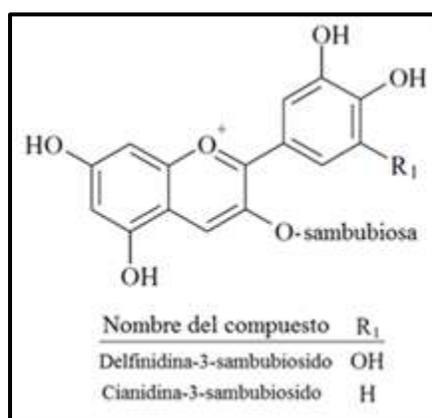


Figura 4. Estructura química de antocianinas presentes en jamaica.

También, son ricos en ácidos orgánicos como ácido cítrico, ácido málico, ácido tartárico y ácidos polifenólicos (ácido de hibisco y ácido protocatecólico). Recientemente Jabeur *et al.* (2017) han informado que el ácido oxálico, los ácidos shikímico y fumárico son el principal ácido orgánico con ácido málico (9.10 g/100 g) como el ácido más abundante. Por lo tanto, los cálices de jamaica que son ricos en la composición nutricional pueden usarse como suplementos nutricionales y también como un alimento funcional o ingrediente alimentario funcional.

Las hojas de jamaica son una buena fuente de diversos nutrientes como proteínas, grasas, carbohidratos, fósforo, hierro, β -caroteno, riboflavina y ácido ascórbico. Contienen altos niveles de compuestos polifenólicos, principalmente ácido clorogénico y sus isómeros quercetina y glucósidos de kaempferol que contribuyen a la capacidad antioxidante y la actividad antiinflamatoria (Zhen *et al.*, 2016)

Las semillas de jamaica son una buena fuente de aceite graso crudo (21.85 %), proteína cruda (27.78 %), carbohidratos (21.25 %), fibra cruda (16.44 %) y cenizas (6.2 %). En términos de minerales, el más frecuente es el potasio seguido de sodio, calcio, fósforo y magnesio. Los principales ácidos grasos saturados identificados en el aceite de semilla son ácido palmítico (20.84 %) y esteárico (5.88 %), y los principales ácidos grasos insaturados son el ácido oleico (32.06 %) y el linoleico (39.31 %) (Nzikou *et al.*, 2011).

2.2.3 Propiedades de la jamaica.

La evidencia disponible sugiere que los polifenoles y antocianinas presentes en los cálices de jamaica exhiben múltiples efectos biológicos. Numerosos informes de investigación destacaron los cálices secos como la fuente potencial de moléculas bioactivas que ejercen una potente actividad antioxidante-antirradical, acción antiinflamatoria, antiobesidad, antihiperlipidémica, antihipertensiva, inhibición de la agregación plaquetaria, diurética, antiurolitica, antimicrobiana, anticancerígena, hepatoprotectora, renovadora, propiedades antitumorales, inmunomoduladoras (Zakaria *et al.*, 2015; Formagio *et al.*, 2015)

Los estudios sobre las propiedades antimicrobianas de la jamaica se asocian con el contenido de compuestos polifenólicos. Por primera vez, un estudio *in vitro* realizado por Alshami y Alharbi (2014) destacó el efecto del extracto metanólico de *Hibiscus sabdariffa* contra aislados antimicóticos de la candiduria y la actividad de inhibición de biopelículas. Utilizaron 6 cepas de *Candida albicans* resistentes a fluconazol obtenidas de pacientes con candiduria recurrente. Los valores mínimos de concentración inhibitoria oscilaron entre 0.5 y 2 mg/ml e informaron que *Hibiscus sabdariffa* fue eficaz a todos los niveles en la inhibición de *Candida albicans*. Este estudio proporciona una base científica para su uso en la medicina popular para el tratamiento y la prevención de infecciones del tracto urinario. Borrás-Linares *et al.* (2015) informaron la actividad antibacteriana de los extractos etanólicos de 25 variedades de jamaica mexicano contra bacterias Gram positivas y Gram negativas, siendo más efectivos contra las bacterias Gram positivas.

Higginbotham *et al.* (2014), emplearon extractos de jamaica a modo de enjuague antimicrobiano, ya que expusieron que utilizar de 120 a 240 mg/ml de cálices a diferentes tiempos de inmersión se puede reducir en 1.5 log UFC/g de muestra para *L. monocytogenes*, mientras que para *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) se puede reducir a niveles indetectables.

Morales-Cabrera *et al.* (2013) analizaron la actividad antimicrobiana de extractos de cáliz de cinco variedades de *Hibiscus sabdariffa* frente a *S. Typhimurium* y *Salmonella choleraesuis*. Aplicaron extractos de cáliz producidos con agua, etanol y metanol a cultivos de *Salmonella*. Todos los extractos presentaron actividad antimicrobiana hacia los serotipos de *Salmonella* y el mayor efecto lo presentó la variedad alma blanca.

2.3 Electrohilado

El electrohilado es uno de los procesos más sencillos y versátiles para la producción de nanofibras de polímeros sintéticos y naturales, a escala micro o nanométrica. Consiste en aplicar un voltaje entre la punta de una aguja y un colector, provocando la salida de un jet (Figura 5). Esta técnica utiliza la acción de un campo eléctrico externo aplicado a la solución del polímero (Okutan *et al.*, 2014). Se ha utilizado en varias aplicaciones (industria médica, farmacéutica, textil y eléctrica) durante los últimos años debido a su versatilidad y bajo costo (Leidy y Ximena, 2019). Las nanofibras electrohiladas se han propuesto ampliamente para el envasado en el campo de los alimentos; sin embargo, existe un gran potencial con respecto a las aplicaciones comestibles (aunque hay consideraciones especiales involucradas en su diseño y producción).

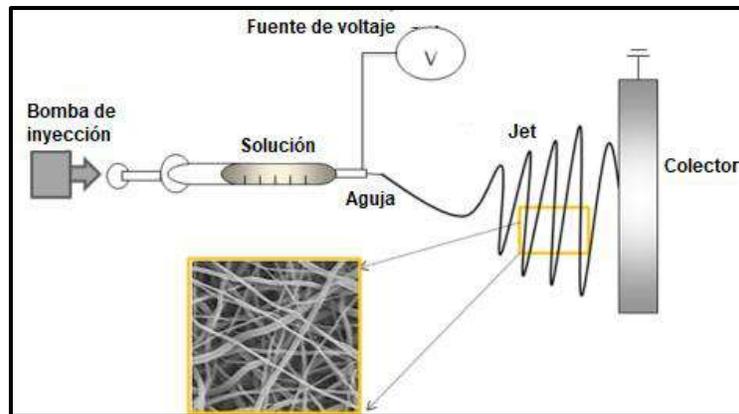


Figura 5. Proceso de electrohilado (Shin *et al.*, 2012).

2.3.1 Fundamento y características.

El electrohilado se basa en utilizar fuerzas eléctricas que superen las fuerzas de la tensión superficial en la solución de polímero cargado, lo cual provocará que finos jets de solución sean expulsados desde el capilar hasta el colector, sin embargo, durante el desarrollo del proceso existen variables que intervienen en las propiedades de los elementos obtenidos, ya que están ligadas a las características del material base (Sánchez *et al.*, 2013).

Esta técnica otorga a los productos desarrollados distintas propiedades tales como amplia superficie por unidad de área, porosidad y propiedades mecánicas. El electrohilado es una técnica versátil, de fácil ensamble y bajo costo lo cual ha permitido procesar una gran variedad de polímeros, no obstante, durante el desarrollo del proceso existen una serie de variables que intervienen en las propiedades de los productos fabricados (Sánchez *et al.*, 2013). En los últimos años el electrohilado se ha convertido en un proceso más atractivo ya que se pueden trabajar una gran variedad de materiales con relativa facilidad (Bellan y Craighead, 2011).

2.3.2 Componentes del proceso de electrohilado.

El electrohilado es un proceso sencillo porque se requieren pocas piezas: una fuente de alimentación de alto voltaje, una bomba de jeringa, un tubo capilar (jeringa) con una aguja o punta capilar (hilera) y un colector (Esfanjani y Jafari, 2016); la figura 6

muestra las partes involucradas en el electrohilado. El proceso implica una solución de polímero que se bombea a través de una jeringa; al mismo tiempo, se aplica un alto voltaje a la hilera para atraer la gota hacia el colector.

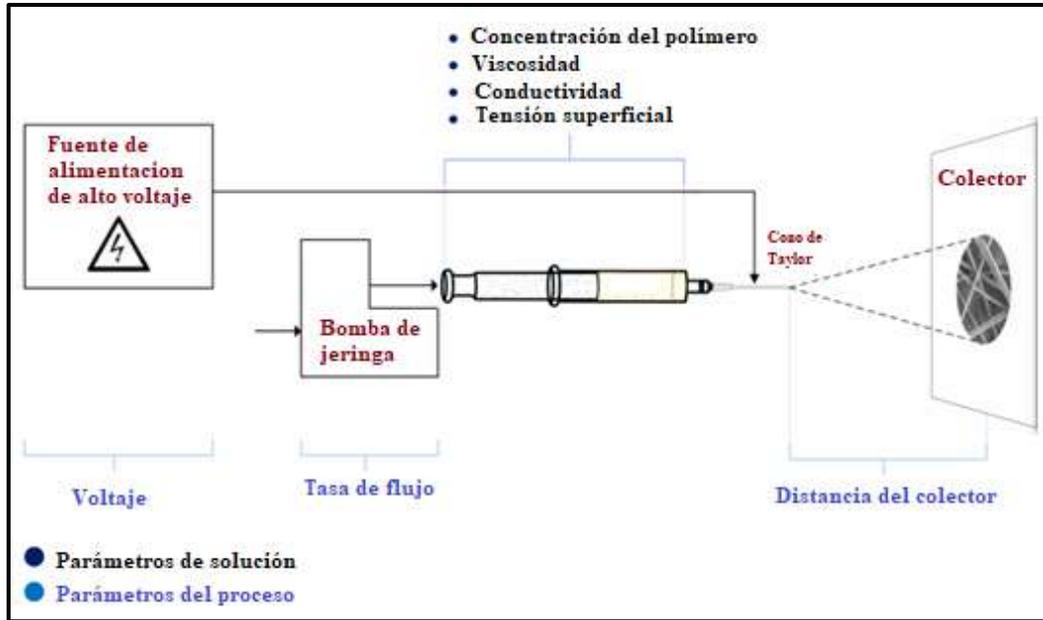


Figura 6. Componentes del proceso de electrohilado.

El giro eléctrico se puede dividir en dos fases. La primera fase consiste en la formación de cono de Taylor y un jet de solución debido a la polarización bajo alto voltaje; el cono de Taylor se forma cuando la fuerza eléctrica alcanza un valor igual a la fuerza de tensión superficial y la gota adquiere una forma cónica (Fathi *et al.*, 2014). La segunda fase implica la formación de nanofibras en una pantalla metálica colectora, tambor o placa; se expulsa un jet de líquido cuando el campo eléctrico ha alcanzado un valor crítico (formación de cono de Taylor) seguido por el alargamiento de la gota colgante y la producción de nanofibras (Ghorani y Tucker, 2015).

2.3.3 Parámetros importantes que afectan el proceso.

Las principales variables que afectan el proceso de electrohilado son los parámetros de solución polimérica, el proceso, y las condiciones ambientales.

- a) Parámetros de la solución: concentración, peso molecular, viscosidad, tensión superficial y conductividad eléctrica.

- b) Parámetros del proceso: voltaje, velocidad de flujo, tipos de colectores y distancia de la punta de aguja al colector.
- c) Parámetros ambientales: humedad y temperatura.

El efecto de algunos parámetros sobre las fibras se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Efecto de algunas variables en las fibras electrohiladas.

| Variable | Efecto |
|--|--|
| Aumento de la tensión aplicada | El diámetro de la fibra inicialmente disminuye, luego aumenta (no es monótono) |
| Aumento del flujo | Aumenta el diámetro de la fibra (se producen morfologías de perlas si el flujo es demasiado alto) |
| Aumento de la distancia entre la aguja y el colector | El diámetro de la fibra disminuye (se producen morfologías de cuentas si la distancia entre la aguja y el colector es demasiado corta) |
| Aumento de la concentración del polímero | Aumenta el diámetro de la fibra (dentro del rango óptimo) |
| Aumento de la conductividad de la solución | Disminuye el diámetro de la fibra (distribución amplia del diámetro) |
| Incremento de la volatilidad del solvente | Las fibras presentan una microtextura superficial (poros/rugosidad en sus superficies, lo que puede aumentar el área de la superficie) |

Fuente: Sill y Von Recum, 2008.

2.3.4 Polímeros de interés empleados en el electrohilado.

Existe una gran variedad de polímeros naturales que se han utilizado en la fabricación de fibras electrohiladas, debido a que tienen varias ventajas en comparación con los polímeros sintéticos, como, por ejemplo: alta

biocompatibilidad, mínima toxicidad y bajo costo de elaboración. Dentro de los biopolímeros más empleados en la elaboración de fibras se tienen proteínas como el colágeno, gelatina, elastina, amaranto, maíz y soya (Aceituno *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2014; Kayaci y Uyar, 2012; Swarnalatha *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013), mientras que en carbohidratos se encuentra el quitosano, celulosa y pululano (Jia *et al.*, 2011; Karim *et al.*, 2009; Geng *et al.*, 2005).

1. Proteínas: son biopolímeros difíciles de electrohilar, debido principalmente a sus estructuras secundaria y terciaria, siendo las proteínas globulares las más dificultosas ya que presentan poca interacción entre sí. Se ha electrohilado gelatina, proteínas de soya, zeína, amaranto, suero lácteo, entre otros.
2. Polisacáridos: la fabricación de fibras con polisacáridos resulta del grado de entrecruzamiento de las cadenas del polímero y su estructura química. Se han utilizado almidón, celulosa, quitosano, pululano, etc.
3. Sintéticos: polímeros que forman fibras electrohiladas fuertes, siendo los más utilizados el ácido poliglicólico, poliglicólico de lactida, poliuretano, policaprolactona, ácido poliláctico, poliestireno y alcohol polivinílico.

Los polímeros naturales otorgan características que pueden emular las funciones biológicas, pero no tienen control sobre las características estructurales. Los polímeros sintéticos facilitan el control de la estructura, sin embargo, la magnitud de señalización es baja (Jenkins y Little, 2019). Se pueden hacer mezclas entre polímeros naturales y sintéticos con la finalidad de aprovechar las características de los materiales otorgando buenas propiedades mecánicas y térmicas dependiendo del área de aplicación (Molfino *et al.*, 2020)

2.3.5 Aplicación de nanofibras en alimentos.

Las nanopartículas se utilizan en los alimentos principalmente enfocándose en mejorar la utilización de los sistemas de dispersión, con la finalidad de aumentar su biodisponibilidad (Leidy y Ximena, 2019).

Las nanofibras se han utilizado en recubrimientos y películas comestibles en diferentes variedades de alimentos (frutas, verduras, carnes, chocolates, dulces, productos de panadería, entre otros). Se han producido películas comestibles de hidroxipropilmetilcelulosa reforzadas con nanopartículas de celulosa microcristalina para ser utilizadas en alimentos con el objetivo de que actúen como barreras de humedad, de lípidos y gases, previniendo la migración de los componentes del aroma (Bilbao-Sáinz *et al.*, 2010). Otra aplicación es la producción de materiales de envase con agentes conservadores, logrando con esto un suministro controlado de nutrientes, un aumento de la biodisponibilidad de los compuestos bioactivos y alimentos funcionales ricos en nutrientes (Shrivastava y Dash, 2012). También, se han creado nanosensores que pueden hallar microorganismos patógenos y micotoxinas presentes en los alimentos (*Escherichia coli*, *Salmonella* Infantis y *Vibrio parahaemolyticus*) (Shrivastava y Dash, 2012).

Varios investigadores han informado recientemente sobre el potencial de la técnica de electrohilado para producir estructuras multicapa biodegradables, demostrando que el uso de este método de procesamiento fue crucial para lograr una buena adhesión entre los diferentes materiales utilizados en las estructuras multicapa, como los biopolímeros hidrofílicos naturales y capas de biopolíéster hidrófobas (como polihidroxicanoatos-PHA) (Alehosseini *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2018; Tampau *et al.*, 2018). De esta manera, el electrohilado también se ha utilizado para la incorporación de esferas activas a base de fibra como recubrimiento del material de embalaje, lo que lleva a capas bioactivas (Fabra *et al.*, 2014). Sin embargo, hay poca información disponible sobre cómo la modificación de la estructura de las fibras puede afectar la liberación de compuestos bioactivos.

2.4 Carne y productos cárnicos

La carne es la parte muscular comestible de los animales de abasto sacrificados y faenados en condiciones higiénicas (Figura 7). Esto incluye las partes de grasa, hueso, tendones, cartílago, piel, nervios, etc., que acompañan al tejido muscular (Horcada y Polvillo, 2010).

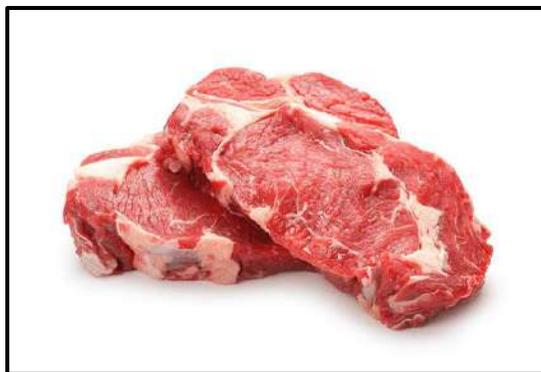


Figura 7. Carne.

Las variaciones de la carne se dan debido a su composición y a su interacción con distintos factores físicos o químicos como la luz, la temperatura o el aire. Las alteraciones más habituales son: enranciamiento, putrefacción y colores desagradables. La carne puede contaminarse con agentes físicos, químicos o biológicos por lo que se deben de establecer ciertos controles a lo largo de la cadena alimentaria y fomentar las buenas prácticas de manufactura.

Este alimento tiene una composición química muy compleja que puede variar debido a factores extrínsecos e intrínsecos, y a las condiciones de manipulación y procesamiento. La carne se evalúa de acuerdo al contenido microbiano y atributos físicos y químicos como la textura, humedad, proteínas y grasa. Para carne fresca se efectúan otras mediciones como el pH, el color y rancidez. El constituyente principal de la carne es de origen proteico (Ayala-Vargas, 2018).

2.4.1 Principales factores de deterioro.

La vida útil de alimentos puede entenderse como el tiempo máximo en el que mantienen sus atributos sensoriales, nutricionales y de inocuidad alimentaria por arriba de un nivel aceptable para su consumo.

El crecimiento microbiano es una de las principales causas del deterioro de la carne almacenada a temperaturas de enfriamiento. El tipo y número de microorganismos son elementos significativos que influyen en la velocidad de deterioro, provocando cambios sensoriales indeseables, que son importantes en la aceptación y vida útil. Cuando la alteración microbiológica de la carne refrigerada es mostrada por la

manifestación sabores y olores desagradables, se dice a nivel general que tiene más de 10^6 UFC/g.

La oxidación de lípidos es otro elemento que puede perjudicar la vida útil de la carne, ya que también puede originar cambios en el color y olor, valor nutritivo y hasta la posible producción de compuestos tóxicos (Esmer *et al.*, 2011). Esta variación puede crearse como resultado de los fenómenos de autooxidación, así como del resultado de la acción de lipasas microbianas (Lorenzo y Gómez, 2012). La importancia sobre la oxidación de lípidos tiene relación con el hecho de que derivados de esta reacción están implicados en la disrupción de las membranas celulares, inactivación de enzimas y el daño de las proteínas.

2.4.2 Sector cárnico en México

El efecto de la pandemia dio como resultado a nivel global un descenso en el consumo de la carne de cerdo. El consumo per cápita llegó a los 69 kg de carne al año, manteniendo a nuestro país en el sexto lugar dentro del ranking mundial. En México se elaboraron aproximadamente 7.3 millones de toneladas de cárnicos permaneciendo en la séptima posición de la fabricación mundial. (Comecarne, 2021).

Los mexicanos prefieren la carne de pollo en la cual su consumo alcanzó los 4.4 millones de toneladas. La producción que más creció fue la carne de cerdo con 3.1 % (Comecarne, 2021). En segundo lugar, se encuentra la carne de porcino, en el cual los principales estados productores son Jalisco, Sonora y Puebla.

2.4.3 Clasificación de los productos cárnicos

Clasificación de los productos cárnicos (FAO, 2014):

- Cárnicos frescos: el proceso de elaboración no tiene métodos de cocción, salazón y desecación.
- Embutidos crudos curados: productos que llevan incorporados en su fabricación condimentos, especias y aditivos.

- Salazones cárnicas: carnes y productos de despiece no picadas sometidos a la acción de la sal común y otros ingredientes autorizados.
- Productos tratados con calor: productos que llevan incorporados condimentos y especias, que utilizan un tratamiento térmico, puede incluir madurado o ahumado o ambos.
- Productos cárnicos secos: estos productos son el resultado de la simple deshidratación de carne magra. La carne seca posee una vida útil más larga en comparación a la carne fresca.
- Embutidos crudos-fermentados: son una mezcla de carnes magras y tejidos adiposos adicionadas con sal de curado, azúcares y otros ingredientes no cárnicos.

2.4.4 Trabajos relacionados a la conservación de productos cárnicos

Hoy en día, los consumidores se han vuelto conscientes de su salud y exigen productos más saludables. Teniendo esto en cuenta, se están llevando a cabo investigaciones para encontrar y utilizar nuevos productos naturales que puedan ser una buena opción para su uso en productos cárnicos. Varios compuestos naturales pueden ser antioxidantes y antimicrobianos eficaces para prevenir el deterioro de la calidad de la carne y los productos a base de carne y, por lo tanto, ser alternativas viables a los sintéticos (Islam *et al.*, 2017). El deterioro de los productos cárnicos durante el procesamiento, distribución y exposición en los mercados tiene un importante impacto negativo en la industria cárnica desde un punto de vista económico. Dos de los principales problemas de la carne y los productos durante el procesamiento y el almacenamiento posterior son la oxidación y el deterioro de los lípidos debido al crecimiento de microorganismos (Domínguez *et al.*, 2018).

Uno de los procesos más perjudiciales en los alimentos grasos es la oxidación de lípidos que ocurre durante la producción y el almacenamiento, lo cual influye en su composición e inocuidad. Vilarinho *et al.* (2018) investigaron el efecto de las películas de ácido poliláctico (PLA) y montmorillonita en el empaquetado de salami en rodajas. Los resultados indicaron que las películas principalmente debido a sus

propiedades mejoradas de barrera al agua, reducen la oxidación de lípidos de los alimentos grasos como el salami. La presencia de montmorillonita en la película del polímero puede reducir la oxidación de los lípidos de los productos cárnicos procesados, alargando su vida útil, lo que sugiere que esta película de nanocompuestos es una buena alternativa a los bioplásticos convencionales. Sin embargo, el uso de nanopartículas en los materiales de envasado de alimentos requiere de mayor estudio con respecto a la toxicidad o como alternativa al aseguramiento de la no migración de nanopartículas del material de pared al alimento.

Panrong *et al.* (2019) desarrollaron películas activas a partir de almidón acetilado de yuca y té verde evaluadas en tocino. El té verde, el almidón nativo de yuca y el almidón acetilado de yuca con diferentes grados de sustitución se extruyeron junto con polietileno lineal de baja densidad. La película con almidón acetilado demostró una hidrofobicidad superficial reducida con una mayor permeabilidad al vapor de agua y la solubilidad de la película se atribuyó a la formación de poros. La liberación del té verde de la matriz de almidón limitó efectivamente el crecimiento microbiano, redujo la formación de pigmento marrón de formación de metioglobina y estabilizó el color rojo del tocino. Los hallazgos indicaron el potencial del almidón acetilado y el té verde para producir un empaque ecológico activo utilizando procesos comerciales de extrusión de película soplada.

Takma y Korel (2019) llevaron a cabo la fabricación de películas activas de polietileno tereftalato (PET) ensambladas con quitosano antimicrobiano y recubrimientos de alginato que contienen aceite de comino negro (ACN) teniendo como objeto de estudio pechuga de pollo. La incorporación de ACN en la película demostró actividad antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. Se observaron cambios en la pérdida de peso, color, pH, recuentos de bacterias mesofílicas aeróbicas totales y psicrotróficas de carne de pollo, envasadas en bandejas que contienen películas antimicrobianas. De acuerdo con los resultados obtenidos, el empaque activo antimicrobiano que incorpora ACN puede usarse

como un sistema prometedor para mantener la calidad y la seguridad de los productos cárnicos frescos.

Arjenaki *et al.* (2019) realizaron un estudio con la finalidad de diseñar un prototipo de paquete de material de cambio de fase para mantener la temperatura y la calidad del frío de la carne durante su exposición a temperatura ambiente, o durante las fluctuaciones de temperatura en vehículos refrigerados. El tetradecano se empacó y se colocó en la parte superior, inferior o en ambos lados de la carne en el paquete. Las gráficas de temperatura respecto del tiempo mostraron que el lugar donde se colocó el tetradecano tuvo un efecto significativo en el mantenimiento de la temperatura de la carne durante la incubación a 12.5 °C. En base a los resultados, el material de empaque con tetradecano puede prevenir efectivamente el aumento de la temperatura de la carne en aproximadamente 2 horas mientras se mantiene la calidad de la carne.

Borzi *et al.* (2019) desarrollaron una película con extracto de té verde aplicada a carne fresca. La película desarrollada mostró excelentes capacidades antioxidantes después de ensayos *in vitro* e *in vivo*, confirmando la capacidad de eliminar los radicales libres por efecto del té verde y cafeína. El análisis realizado en muestras de carne molida destacó un efecto protector de la película sobre la variación del color de la carne medida a través del índice colorimétrico a^* . La película activa también mostró efectos sobre los índices de calidad relacionados con la oxidación de las grasas y la mioglobina.

Daniloski *et al.* (2019) evaluaron parámetros de calidad de carne de cerdo fresca refrigerada empacada al vacío con un revestimiento. La película de polipropileno orientada biaxialmente recubierta con cloruro de acrílico/polivinilideno (BOPPAcPVDC) proporcionó una mejor protección para la carne de cerdo fresca que la película de polipropileno coextruido orientado biaxialmente (BOPPcoex) en términos fisicoquímicos, sensoriales y microbiológicos, debido a su mayor comportamiento de barrera. BOPPAcPVDC fue un mejor material de empaque para carne de cerdo fresca empaquetada al vacío, ya que aumentaba la vida útil con la calidad original de la carne durante el almacenamiento. Los resultados también

sugieren que esta técnica de combinación podría usarse como una tecnología de envasado rentable en la conservación de carne de cerdo fresca y, en consecuencia, su calidad, seguridad e higiene aumentarán significativamente.

Pirsa y Shamusí (2019) analizaron películas inteligentes y activas basadas en celulosa bacteriana (BC) modificada por un nanocompuesto de polipirrol-óxido de zinc (BC-PPy-ZnO). Se estudiaron los efectos de la película BC-PPy-ZnO sobre las características del muslo de pollo, incluido el pH, la propiedad antimicrobiana (bacterias mesofílicas y psicrófilas), color, las propiedades antioxidantes y reológicas. Los resultados mostraron que la película BC-PPy-ZnO disminuye el crecimiento de la carga microbiana en el muslo de pollo y controla el aumento del pH. Además, la película BC-PPy-ZnO podría aumentar la vida útil y estabilizar las propiedades reológicas del muslo de pollo al aumentar la actividad antioxidante y antimicrobiana como empaque activo. En base a esto, existen buenas relaciones entre el cambio de resistencia eléctrica de la película y el tiempo de almacenamiento respecto a la temperatura de almacenamiento, lo que podría permitir estimar el tiempo y la temperatura de almacenamiento del muslo de pollo como empaque inteligente.

Liu *et al.* (2020) prepararon una nanoemulsión con aislado de proteína de soja al 1.5 %, la cual mostró buena estabilidad y un efecto antimicrobiano en microorganismos en la carne de Yao. La vida útil del producto se extendió de 8 días a 16 días debido a la inhibición del crecimiento bacteriano durante el almacenamiento. El estudio confirmó que el recubrimiento activo a base de nanoemulsión con aceite esencial de anís estrellado combinado, polilisina y nisina, es un recubrimiento potencial para mejorar la calidad y la vida útil de los productos de carne Yao.

Zhai *et al.* (2020) desarrollaron películas de bicapa sensibles a aminos usando agar (AG), antocianinas (AN), goma gellan (GG) y nanopartículas de TiO₂ para el control visual del deterioro de la carne. La capa AG-AN funcionó como capa de detección de aminos volátiles, mientras que la capa GG-TiO₂ sirvió como capa de barrera de luz y capa conductora para mejorar la estabilidad de la iluminación y la capacidad

de escritura electroquímica de la capa AG-AN, respectivamente. En base a su buena estabilidad de iluminación y capacidad de detección de gases básicos, la película exhibió cambios de color rojo a verde rosa asociado con el deterioro de la carne de cerdo, lo que indica su gran potencial para monitorear el deterioro de carne.

Por otra parte, Mohammadi *et al.* (2019) evaluaron el efecto de las películas de nanocompuestos basados en carboximetilcelulosa (CMC), mucílago de quimbombó (OM) y nanopartículas de ZnO (ZnONP) en la vida útil de la carne de pechuga de pollo almacenada a 4 °C. Los resultados del estudio sobre la calidad de la carne de pechuga de pollo a 4 °C durante 12 días, empaquetados con diferentes películas, indican que la vida útil de la carne de pollo se puede extender usando mucílago de quimbombó y nanopartículas de ZnO. La adición de mucílago de quimbombó más nanopartículas de ZnO a CMC tuvo un efecto antimicrobiano en la carne de pollo retrasando además la oxidación de lípidos de la carne de pollo.

Souza *et al.* (2019) incorporaron dispersiones en forma de película de quitosano con montmorillonita (MMT) y diferentes niveles de aceite esencial de romero (AR). La incorporación de AR aumenta la permeabilidad de la película tanto al vapor de agua como al oxígeno, mientras que la incorporación de MMT reduce ambas permeabilidades. Los bionanocompuestos desarrollados actuaron como un buen vehículo para extender la vida propia de los alimentos y mejorar la calidad de los productos cárnicos. Retardaron la oxidación de los lípidos, el crecimiento microbiológico de las bacterias de descomposición, la decoloración de la carne y el aumento de los valores de pH. Las películas mostraron potencial para ser utilizadas por la industria alimentaria, una vez que pueden sustituir las películas de plástico comerciales y extender la vida útil de los productos (carne de aves de corral).

Saricaoglu y Turhan (2019) investigaron el rendimiento de los recubrimientos de proteínas de carne de pollo deshuesadas mecánicamente (MDCM-P) que contienen tomillo (AET) o aceites esenciales de clavo (AEC) para mejorar la calidad de almacenamiento de los sucuks tratados con calor durante 45 días de almacenamiento a 4 °C. Se analizaron propiedades físicas, químicas y microbianas

de las muestras de sucuk. La aplicación de recubrimiento basada en MDCM-P con AEC disminuyó la pérdida de peso, retrasó el deterioro del color, inhibió la oxidación de lípidos, retrasó el crecimiento de microorganismos y mejoró la calidad de almacenamiento de los sucuks tratados térmicamente en almacenamiento refrigerado. Sin embargo, mostró un impacto negativo en la actividad del agua. Este estudio sugiere que las soluciones de recubrimiento de MDCM-P que contienen AET y AEC podrían ser útiles para muestras de sucuk de carne en rodajas para retrasar el deterioro oxidativo, físico y microbiológico.

Arkoun *et al.* (2018) realizaron un estudio en busca de la eficiencia *in vitro* e *in situ* de las nanofibras a base de quitosano electrohilado (CNF) como parte interna de un empaque de múltiples capas para mantener la calidad de la carne roja sin procesar. Los envases activados basados en CNF (CNFP) se obtuvieron mediante electrohilado directo de soluciones de quitosano/poli (óxido de etileno) en la parte superior de un empaque convencional de alimentos multicapa. Se determinó la actividad antibacteriana *in vitro* de los CNF contra *Escherichia coli*, *Salmonella enterica serovar Typhimurium*, *Staphylococcus aureus* y *Listeria innocua*, bacterias comúnmente incriminadas en la alteración de productos alimenticios. Este estudio es el primero que investiga la eficiencia de los CNF electrohilados cuando se combina con un embalaje existente para mejorar la inocuidad, calidad y extender la vida útil de un producto alimenticio en condiciones reales. CNFP muestra un potencial como material de empaque antimicrobiano que preserva la calidad y frescura de los alimentos no procesados o mínimamente procesados y perecederos como la carne, junto con la extensión de la vida útil de la carne a una semana.

Vytejčková *et al.* (2017) llevaron a cabo una evaluación general de nuevos materiales basados en succinato de polibutileno (PBS) y co-adipato de succinato de polibutileno (PBSA) derivados de recursos renovables. Este trabajo se centró en el análisis práctico de dos materiales, que se aplicaron para el envasado al vacío de carne cruda de pollo, pavo y carne de pavo ahumada. Las propiedades físicas, químicas y mecánicas de estos materiales se compararon con el material de embalaje de uso común basado en poliamida/polietileno (PA/PE). Se probaron los

parámetros funcionales de los materiales de embalaje, como el espesor de la película, la velocidad de permeabilidad del vapor de agua, la permeabilidad al oxígeno, la resistencia a la tracción, la transmitancia y la migración general. Este estudio reveló la aplicabilidad de los materiales probados basados en succinato de polibutileno para el envasado de la carne de ave cruda y ahumada.

Kurek *et al.* (2019) utilizaron quitosano (CS) y carboximetilcelulosa (CMC) como matrices de polímeros para la inmovilización de los indicadores de color sensibles al pH. Utilizaron extractos de arándano (BP) y orujo de piel de uva roja (RP) debido a que generalmente son considerados como un desperdicio de alimentos. La adición de extracto de orujo de arándano y de orujo de piel de uva roja no influyó significativamente en las propiedades mecánicas de las películas fabricadas que es de gran importancia para el manejo y la aplicación de la película. Las películas probadas en paquetes con muestras de carne fresca cambiaron su color en correlación con los cambios de pH de las muestras de carne en mal estado. Este cambio de pH se debió al deterioro de la carne, por lo que estos indicadores podrían usarse como una forma no invasiva para informar a los consumidores sobre la aceptación general de la carne para el consumo.

Rios-Mera *et al.* (2019) realizaron un estudio acerca de la microencapsulación. El aceite de pescado presenta beneficios para la salud, pero genera sensorialmente sabores y olores desagradables originados por la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados. Se obtuvieron micropartículas por coacervación compleja usando inulina como agente de coacervación. El efecto de este polisacárido fue determinante en la optimización del rendimiento del proceso y la eficiencia de encapsulación del aceite de pescado. Las micropartículas descritas pueden usarse como un ingrediente potencialmente funcional en los alimentos.

Robert *et al.* (2019) trabajaron con emulsiones dobles (ED) con una mezcla de aceite saludable como fase lipídica y un extracto de hojas de olivo (EHO) encapsulado en la fase acuosa interna. Las emulsiones se incorporaron como sustitutos de grasa en sistemas de carne, con el fin de mejorar tanto el perfil lipídico como la estabilidad oxidativa. Se encontró una alta correlación entre el contenido

de oleuropeína restante y la capacidad antioxidante tanto en sistemas de carne con las emulsiones como en sistemas de carne con la mezcla de aceite líquido y EHO no encapsulado. La encapsulación de EHO en la ED impidió la degradación de la oleuropeína, lo que condujo a sistemas de carne con menores contenidos de valores de peróxido y TBARS, así como una mayor capacidad antioxidante con respecto a los sistemas de carne con EHO no encapsulado. La encapsulación del extracto podría ser una estrategia adecuada para evitar la oxidación de lípidos en sistemas de carne con un perfil de lípidos más saludable.

III. JUSTIFICACIÓN

Normalmente, la industria cárnica ha empleado un gran número de antioxidantes químicos (butilhidroxitolueno, galato de propilo, butilhidroxianisol, etc.) como un procedimiento efectivo y económico para reducir los fenómenos oxidativos y disminuir la aparición de olores y sabores desagradables, y la pérdida de vitaminas o aminoácidos, no obstante, el empleo de este tipo de compuestos está limitado a ciertas cantidades, además de que presentan inconvenientes ya que son bastante volátiles y se descomponen con facilidad a altas temperaturas.

El uso de antioxidantes de origen natural en forma de compuestos puros, extractos y aceites esenciales se ha explorado dentro de la industria cárnica en los últimos años para encontrar sustancias que disminuyan el grado de deterioro de la carne y sus derivados. Los extractos de jamaica tienen una gran diversidad de compuestos fenólicos que le otorgan varias propiedades y beneficios para la salud. Existen estudios que han demostrado las diferentes propiedades y beneficios que contiene esta planta.

Uno de los aspectos importantes dentro de la conservación de los alimentos es el tipo de empaque que se utiliza. Existen diferentes métodos para generar empaques o películas activas que ayuden a aumentar la vida útil de los alimentos. El electrohilado permite proteger la degradación de nutrientes importantes de los alimentos, ya que se pueden encapsular compuestos que disminuyan la degradación de moléculas en las fibras que se generan.

Por lo tanto, la importancia de este proyecto es generar una película mediante electrohilado con proteína de amaranto y extracto fenólico de jamaica que pueda ser capaz de conservar las características sensoriales de un producto cárnico, debido a que los compuestos antioxidantes de la jamaica se encontrarán encapsulados en las fibras lo cual podría disminuir el grado de deterioro del alimento debido a las propiedades antioxidantes y antimicrobianas que posee.

IV. HIPÓTESIS

Al utilizar extractos provenientes de jamaica (*Hibiscus sabdariffa L.*) adicionados a una película electrohilada de proteína de amaranto, se puede conservar la calidad sensorial de un producto cárnico.

V. OBJETIVOS

Objetivo general.

Desarrollar una película electrohilada de proteína de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) enriquecida con extractos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) para la conservación de alimentos cárnicos.

Objetivos específicos.

1. Evaluar la actividad antioxidante y antimicrobiana del extracto de *Hibiscus sabdariffa* L.
2. Obtener películas electrohiladas de proteína de amaranto con extracto de *Hibiscus sabdariffa* L.
3. Determinar el efecto de la película sobre parámetros de calidad de un producto cárnico.
4. Determinar el efecto de la película sobre la carga microbiana de un producto cárnico.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Jamaica roja, jamaica blanca (“alma blanca”, Oaxaca), amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*).

6.1.1 Reactivos

Acido gálico (sigma Aldrich), trolox (Sigma-Aldrich), reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich), DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (Sigma-Aldrich)), ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico)(Sigma-Aldrich)), polivinil alcohol (Mw 130,000 99+% hidrolizado (Sigma-Aldrich)), butilhidroxitolueno (Sigma-Aldrich), ácido 2-tiobarbitúrico (J.T. Baker).

6.2 Obtención y caracterización de los extractos fenólicos de jamaica.

6.2.1 Obtención del extracto fenólico.

Se utilizaron 2 variedades de jamaica (Figura 8), una roja y una blanca. Los extractos se prepararon siguiendo el método de Ersus y Yurdagel (2007) con modificaciones. Se tomaron 15 g de jamaica (roja y blanca) los cuales se trituraron en mortero y se les adicionó 25 ml de agua destilada más 25 ml de etanol al 96 %, dejándolos en agitación constante durante 24 horas (300-400 rpm) a temperatura ambiente cubiertos de papel aluminio. Posteriormente, el extracto se centrifugó a 12 000 rpm por 15 minutos y el sobrenadante se guardó en congelación hasta su uso.



Figura 8. De izquierda a derecha: jamaica roja y jamaica blanca.

6.2.2 Determinación de compuestos fenólicos totales.

Se realizó empleando el método espectrofotométrico descrito por Singleton y Rossi (1965) con modificaciones. Se adicionaron en una microplaca 150 μ l del reactivo Folin [1:10], para el cual se tomaron 2.5 ml de Folin en 25 ml de agua, 30 μ l del extracto fenólico y 120 μ l de Na_2CO_3 al 7.5%, el cual se preparó pesando 1.875 g de carbonato de sodio para 25 ml de agua. La curva estándar se formó con 8 puntos dentro de los cuales se incluyó un blanco. Para el punto más alto de la curva se elaboró primeramente una solución "A" que se preparó pesando 5 mg diluidos 5 ml de agua. Para preparar la solución "B" se tomó 1 ml de la solución "A" y se aforó a 10 ml, esta nueva solución "B" tuvo una concentración de 0.1 mg/ml, de la cual se tomó 1 mililitro y se trasvasó a un tubo Eppendorf. Del punto más alto se tomaron 500 μ l y se trasvasaron al tubo 2 y así sucesivamente hasta el tubo 6 el cual terminó con un volumen de 1 ml. Después de 30 minutos se leyó la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro (Spectra Max 190). Los resultados se reportan como mg de equivalentes de ácido gálico/gramo de peso seco (mg EAG/g).

6.2.3 Capacidad antioxidante mediante DPPH.

Se siguió el método descrito por Fukumoto y Mazza (2000) modificado. Brevemente 20 μ l del extracto de jamaica se adicionó a una microplaca de 96 pozos, así como metanol (blanco). Se les agregaron 200 μ l de solución DPPH (0.0015 g en 25 ml) y se dejaron reposar por 6 minutos. Se leyó la absorbancia a 520 nm en un espectrofotómetro (Spectra Max 190). La curva de calibración de trolox se realizó de 50-800 μ M. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de trolox/g muestra (mg ET/g).

6.2.4 Capacidad antioxidante mediante ABTS.

Se utilizó la técnica descrita por Nenadis *et al.*, (2004) modificado. Primeramente, se mezclaron 5 ml de una solución acuosa de ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico) 7mM y 88 μ l de una solución de persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 140 mM, conservándose en un lugar oscuro durante 12 horas a temperatura ambiente para la generación del radical. Terminado el tiempo, a 500 μ l

de la solución se les agregaron de 20-25 ml de etanol; la absorbancia debe de estar entre 0.7-.75 a 734 nm. Posteriormente, 20 µl del extracto de jamaica se adicionó a una microplaca de 96 pozos, así como metanol (blanco). Se les agregaron 230 µl de solución ABTS y se dejaron reposar por 6 minutos. Se leyó la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro (Spectra Max 190). La curva de calibración de trolox se realizó de 50-800 µM. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de trolox/g muestra (mg ET/g)

6.2.5 Determinación de la actividad antimicrobiana de los extractos.

Se llevó a cabo por la técnica de difusión en agar. Se cortaron círculos de papel filtro con una perforadora de hojas, a los cuales se les agregó 20 µl de cada uno de los extractos de jamaica. Agar soya tripticasa (AST) atemperado a 45 °C se inoculo con *L. monocytogenes* para tener una concentración aproximada de 1×10^6 UFC; el agar inoculado se vertió en placas Petri, se dejó solidificar y se incubó a 35 °C por 24 horas. Al término de la incubación se midieron los halos de inhibición con un vernier. El mismo procedimiento se siguió para preparar placas de agar Man, Rogosa y Sharpe (MRS) inoculadas con *L. sakei* y *Leuconostoc* spp.: las placas se incubaron a 30 °C por 48 horas.

6.3 Preparación de reactivos para las soluciones poliméricas.

6.3.1 Preparación del aislado proteico de amaranto (APA) al 5 %.

Para la obtención de APA se utilizó la metodología de Aceituno-Medina *et al.* (2013).

Se tomaron 0.5 g de APA y se les agregó 10 ml de agua destilada. Posteriormente se ajustó el pH a 3 con ácido clorhídrico (0.1 M) y se dejó en agitación constante por 24 horas.

6.3.2 Preparación de polivinil alcohol (PVA) al 7.5 %.

A 0.75 g de PVA se les agregó 10 ml de agua destilada. Se dejó en agitación por 3-4 horas a una temperatura de 70 °C hasta disolverse por completo.

6.3.3 Preparación de butilhidroxitolueno (BHT) al 1%.

Se tomaron 5 mg de BHT y se disolvieron en 5 ml de etanol al 96 %.

6.4 Preparación y caracterización de las soluciones poliméricas y electrohilado

6.4.1 Componentes de las soluciones poliméricas

Se trabajaron con cuatro soluciones poliméricas (figura 9) las cuales se describen continuación:

1. Control: conformada por 70 % PVA, 15 % APA y 15 % etanol/agua. Los porcentajes son en base a volumen.
2. Jamaica roja: conformada por 70 % PVA, 15 % APA y 15 % extracto fenólico de jamaica roja. Los porcentajes son en base a volumen.
3. Jamaica blanca: conformada por 70 % PVA, 15 % APA y 15 % extracto fenólico de jamaica blanca. Los porcentajes son en base a volumen.
4. BHT: conformada por 70 % PVA, 15 % APA y 15 % de BHT.

Nota: los porcentajes son en base a volumen. Por ejemplo: si el volumen total de la solución de jamaica roja hubiese sido 5 ml, el 70 % de PVA sería 3.5 ml, el 15 % de APA sería 0.75 ml y el 15 % de extracto sería 0.75 ml. El proceso es el mismo para las demás soluciones colocando los compuestos de su formulación.

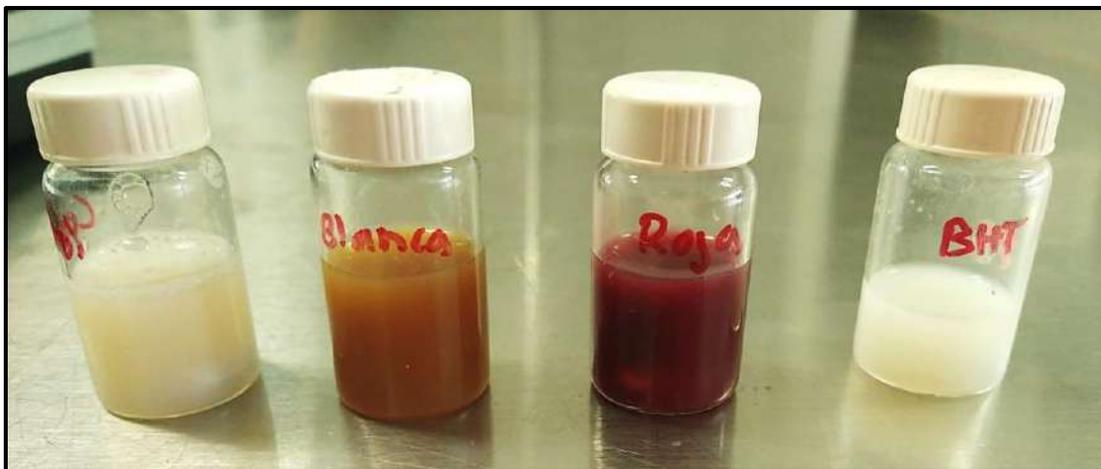


Figura 9. Soluciones poliméricas empleadas, de izquierda a derecha: control, jamaica blanca, jamaica roja y BHT.

Una vez que se colocaron los componentes de cada solución en los recipientes, se dejaron en agitación por 20 min y luego se refrigeraron por 5 min antes de colocarlas en la jeringa para iniciar el proceso de electrohilado.

6.4.2 Determinación de pH.

Se tomaron 5 ml de cada solución polimérica para la medición de pH utilizando un potenciómetro (Orion 420A+ Thermo electron corporation). Los análisis se hicieron por triplicado.

6.4.3 Determinación de conductividad eléctrica.

Se tomaron 5 ml de cada solución polimérica para la medición de la conductividad eléctrica utilizando un conductímetro (Orion star A212 Thermo Scientific). Los análisis se hicieron por triplicado.

6.4.4 Determinación de viscosidad.

La viscosidad de las soluciones se determinó con el reómetro (Figura 10). Se colocaron 7 ml de cada solución polimérica en el recipiente de la aguja. Las mediciones se hicieron a temperatura ambiente (26 °C) y se utilizó un torque mayor al 10 %. Los análisis se hicieron por triplicado.



Figura 10. Medición de viscosidad.

6.4.5 Técnica de electrohilado

Se utilizó una jeringa de 10 ml para electrohilar cada solución, utilizando una aguja de un diámetro de 0.6 mm. La jeringa se colocó horizontalmente sobre una bomba de jeringa dirigiendo la aguja verticalmente hacia el colector (Figura 11). La aguja se conectó al electrodo emisor de polaridad positiva de la fuente de alimentación de alto voltaje. Se formó un jet de la solución de polímero a partir del cono de Taylor el cual viaja y se sitúa en el colector formando películas. Los experimentos de electrohilado se realizaron bajo las siguientes condiciones: voltaje de 23 kV, flujo de 0.5 ml/h, distancia entre la punta de la aguja y el colector de 15 cm, temperatura de 23-26 °C y humedad relativa de 25-45 %.



Figura 11. Sistema de electrohilado.

6.5 Caracterización de las películas.

6.5.1 Determinación de espesor.

Se usó el método descrito por Condés *et al.* (2015). El espesor se midió utilizando un micrómetro (Mitutoyo No. 293-340 IP65 Coolant Proof) haciendo las mediciones en cinco sitios diferentes de cada película.

6.5.2 Determinación del contenido de humedad.

El contenido de humedad se determinó secando en un horno a 105 °C durante 24 h pequeñas muestras de películas ($\approx 4 \text{ cm}^2$). Las películas se colocaron en crisoles a peso constante registrando su peso antes y después del secado al horno. Los resultados se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100$$

Donde M_1 es el peso de secado inicial y M_2 el peso del secado final.

6.5.3 Determinación de color.

El color de las películas se determinó usando un colorímetro (Konica Minolta CM-600D) empleando la escala de color CIE Lab para medir los parámetros L^* , a^* y b^* . Se hicieron mediciones en tres lugares distintos de cada película.

6.5.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM).

La morfología de las películas electrohiladas se determinaron utilizando un microscopio electrónico de barrido (EVO-50 de Carl Zeiss; Jena, Alemania). Los diámetros de las fibras electrohiladas se obtuvieron midiendo 100 fibras individuales con el software ImageJ de las micrografías SEM en su aumento original.

6.5.5 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Las películas se cortaron en pequeños cuadros y se colocaron en un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier, rango de $4000-600\text{ cm}^{-1}$ y resolución de 4 cm^{-1} . Equipo ATR-FTIR Perkin Elmer Spectrum 100 (Aguilar-Vázquez *et al.*, 2018).

6.5.6 Actividad antimicrobiana.

AST atemperado a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ se inoculo con *S. Typhimurium* para tener una concentración aproximada de 1×10^6 UFC; el agar inoculado se vertió en placas Petri, se dejó solidificar y se incubó a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. El mismo procedimiento se siguió para preparar placas de MRS inoculadas con *L. sakei*: las placas se incubaron a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 horas. Las películas se cortaron utilizando un perforador de hoja obteniendo discos de aproximadamente 6 mm de diámetro, los discos de las películas se colocaron en campana con UV por 30 min y se colocaron en 3 puntos diferentes dentro de las placas Petri. Los resultados de actividad inhibitoria son el promedio de 6 datos analizados para cada cepa.

6.6 Incorporación de la película a un producto cárnico.

Se utilizó chuleta ahumada de cerdo como objeto de estudio para ver el efecto de las películas sobre distintos parámetros de calidad del alimento. La chuleta se adquirió en un centro comercial en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro.

Para la determinación de pH y color se utilizaron cortes de $\approx 4 \text{ cm}^2$ (Figura 12) mientras que para la medición de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) se utilizaron cortes de 10 g. Para el análisis microbiológico se emplearon cortes de $1 \text{ cm}^2 (\approx 1 \text{ g})$ (Figura 13).

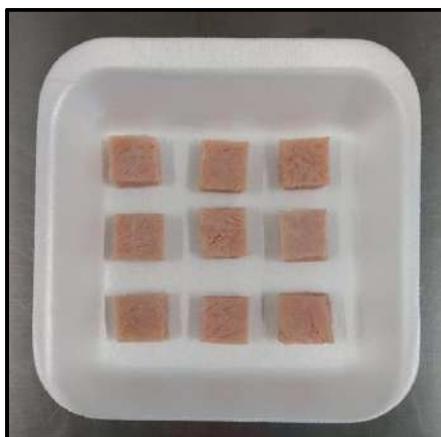


Figura 12. Cortes de chuleta ahumada de cerdo empleados para la determinación de pH, color y TBARS.



Figura 13. Cortes de chuleta ahumada de cerdo para el análisis microbiológico.

La película sólo se aplicó en una cara del corte y se colocaron en charolas de unicel recubiertas de plástico vitafilm (Figura 14). Las charolas conteniendo las chuletas se almacenaron durante 12 días 4 ± 1 °C, y a los días 0, 4, 8 y 12 se hicieron las determinaciones de pH, color, TBARS y actividad antimicrobiana.



Figura 14. Charolas con los cortes de chuleta ahumada de cerdo con las películas correspondientes para almacenar en refrigeración.

6.6.1 Determinación de pH.

A 10 g de chuleta se les agregó 100 ml de agua destilada y se homogeneizó por un minuto. Después, se filtró la mezcla con un tamiz para retirar el tejido conectivo y se realizaron las mediciones con el potenciómetro (Orion 420A+ Thermo electron corporation). Los análisis se hicieron por triplicado.

6.6.2 Determinación de color.

Se siguió el método de Ijaz *et al*, (2020) modificado. Se realizó la medición de color con un colorímetro (Konica minolta CM-600D) en tres puntos del corte empleando la escala CIE Lab para medir los parámetros L^* , a^* y b^*

6.6.3 Determinación de TBARS.

Se siguió la metodología reportada por Zipser *et al.* (1962). A 10 g de chuleta se le añadió 49 ml de agua destilada a 50 °C y se dejó reposar por 2 min. Después, se homogeneizó y filtró la mezcla. Se tomaron 5 ml del filtrado y se agregó 5 ml de TBA. Se colocaron los tubos a baño María a 90 °C durante 15 minutos y después se enfriaron con agua. Se midió la absorbancia a 538 nm con el espectrofotómetro. La absorbancia se multiplicó por el factor de conversión 7.8 para reportar mg de malondialdehído por kg de carne (Tarladgis *et al.*, 1960).

a) Preparación de ácido 2-tiobarbitúrico (TBA).

Se mezclaron TBA (0.288 g) y 10 ml de agua destilada con agitación vigorosa (agitador magnético) entre 10-15 minutos. Posteriormente, se añadió ácido acético glacial hasta dos tercios del volumen del matraz. La mezcla se agitó vigorosamente durante 10 minutos o hasta que el TBA se disolviera por completo. Se terminó de llenar el matraz hasta la marca con ácido acético glacial y se dejó en agitación hasta su uso.

6.6.4 Análisis microbiológico.

El efecto de las películas sobre la chuleta ahumada de cerdo se evaluó contra *L. sakei* ATCC 15521 (resistente a rifampicina) y *L. monocytogenes* ATCC 19115 (resistente a rifampicina). A continuación, se describen los tratamientos utilizados:

1. **Control (-):** carne sin película, sin inocular.
2. **Control (+):** carne sin película, inoculada con *L. monocytogenes*
3. **Control (+):** carne sin película, inoculada con *L. sakei*.
4. **Película control:** carne con la película control inoculada con *L. monocytogenes* y *L. sakei*.
5. **Película con jamaica roja:** carne con la película de jamaica roja inoculada con *L. monocytogenes* y *L. sakei*.
6. **Película con jamaica blanca:** carne con la película de jamaica blanca inoculada con *L. monocytogenes* y *L. sakei*.

7. **Película BHT:** carne con la película de BHT inoculada con *L. monocytogenes* y *L. sakei*.

a) Método.

Se inocularon trozos de chuleta ahumada de cerdo (1 g) con *L. sakei* (5.8 log UFC/g) y *L. monocytogenes* (5.1 log UFC/g). A los trozos de chuleta se les añadió la película, se colocaron en charolas recubiertas con plástico y se almacenaron a 4 °C durante 12 días.

6.7 Análisis estadístico.

Los experimentos se realizaron en un diseño completamente al azar y los resultados se presentarán como la media \pm desviación estándar utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba estadística correspondiente empleando el software jmp pro 16.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Extractos de jamaica.

7.1.1 Compuestos fenólicos totales.

Los resultados del contenido de compuestos fenólicos totales de los extractos de jamaica se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Contenido de fenoles totales de los extractos de jamaica.

| Extracto | mg EAG/g |
|----------------|---------------|
| Jamaica roja | 127.23 ± 0.02 |
| Jamaica blanca | 98.78 ± 0.01 |

EAG: equivalentes ácido gálico. Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar.

Los polifenoles constituyen un amplio grupo de sustancias químicas con distintas estructuras y propiedades químicas y actividad biológica. Químicamente, estos compuestos son sustancias que tienen un anillo aromático, con uno o más grupos hidroxilos. El extracto de la jamaica roja presentó mayor cantidad de compuestos fenólicos que el extracto de la jamaica blanca con un valor de 127.23 ± 0.02 mg EAG/g.

Koala *et al.* (2021) reportaron 138.4 ± 0.5 mg EAG/g de compuestos fenólicos para extracto de jamaica obtenido por maceración utilizando hexano. Borrás-Linares *et al.* (2015) reportaron valores entre 24 ± 3 a 100 ± 4 mg EAG/g para 25 variedades mexicanas de jamaica utilizando etanol acidificado como solvente. Asimismo, resaltaron la necesidad de especificar el genotipo de origen *Hibiscus sabdariffa*, debido a que la mayoría de las publicaciones solo informan que se compraron en supermercados o simplemente se denominaron *Hibiscus sabdariffa*, lo que puede llevar a una variación significativa en los resultados y dificultar las comparaciones.

El contenido fenólico total medido por el método de Folin-Ciocalteu no proporciona un perfil completo de la cantidad de los compuestos fenólicos. Es importante mencionar que las cantidades de compuestos fenólicos entre los diferentes extractos pueden variar debido a la variedad y origen de la planta, la etapa de

madurez, variables ambientales (clima, temperatura, intensidad de luz, uso de fertilizantes) y los solventes y métodos de extracción utilizados.

7.1.2 Capacidad antioxidante por DPPH y ABTS.

Los resultados de la capacidad antioxidante de los extractos de jamaica se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Capacidad antioxidante de los extractos de jamaica.

| Extracto | DPPH (mg ET/g) | ABTS (mg ET/g) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Jamaica roja | 131.17 ± 0.04 | 242.27 ± 0.01 |
| Jamaica blanca | 120.74 ± 0.01 | 562.55 ± 0.1 |

ET: equivalentes de trolox. Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar.

El extracto de la jamaica roja presentó una mayor capacidad antioxidante que el extracto de la jamaica blanca por DPPH con un valor de 131.17 ± 0.04 mg ET/g. Se sabe que los compuestos fenólicos típicos que poseen actividad antioxidante son principalmente ácidos fenólicos y flavonoides, y que a mayor contenido de flavonoides presentes en los extractos mayor es la capacidad antioxidante. Oloumi, Shakeri y Behzadi (2016) estimaron la correlación entre los compuestos polifenólicos y la capacidad antioxidante en cálices de jamaica, explicando que el contenido fenólico total y la capacidad de captación de radicales libres (DPPH) se correlacionan con la cantidad de flavonoides en los extractos.

Jaramillo-Guanuche y Valarezo-Cruz (2021) reportaron valores de capacidad antioxidante por DPPH entre 43.56 ± 0.24 a 57.24 ± 0.68 mg ET/g extracto seco para dos extractos extraídos de diferentes maneras de jamaica (extracción asistida por ultrasonido a 30 °C durante 30-60 min y extracción por calor 100 °C durante 15-30 min), siendo valores bajos en comparación con los obtenidos en este trabajo. Borrás-Linares *et al.* (2015) reportaron valores de capacidad antioxidante por DPPH para 25 variedades mexicanas de jamaica entre 27.4 ± 0.3 a 112 ± 8 μ mol ET/g.

Para el método de ABTS el extracto de la jamaica blanca presentó una mayor capacidad antioxidante que el extracto de la jamaica roja con 562.55 ± 0.01 mg ET/g. Esto puede deberse a que en las variedades blancas se tienen mayores cantidades de ácidos orgánicos los cuales pudieran aportar esta actividad o los flavonoides. Yang *et al.* (2012) obtuvieron valores para diferentes extractos de jamaica que oscilaron entre 423.25 ± 31.38 y 2087.08 ± 201.55 $\mu\text{g/ml}$.

Las diferencias encontradas entre los valores de capacidad antioxidante reportados por diferentes autores y los de este trabajo pueden ser debidos a factores como el origen y variedad de la planta, condiciones de cultivo, métodos de extracción y solventes utilizados, entre otros, ya que, son parámetros que influyen en el contenido y actividad de los compuestos que le confieren esta propiedad.

7.1.3 Actividad antimicrobiana de los extractos.

Se evaluó la actividad antimicrobiana de los extractos de jamaica contra tres bacterias que pueden estar presentes en productos cárnicos; los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Halos de inhibición de los extractos contra diferentes bacterias.

| Bacteria | Jamaica roja (mm inhibición) | Jamaica blanca (mm inhibición) |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>L. sakei</i> | 5.5 ± 0.41 | 6.3 ± 0.47 |
| <i>L. monocytogenes</i> | 4.3 ± 0.47 | 5 ± 0.47 |
| <i>Leuconostoc spp.</i> | - | - |

-: no presentó inhibición. Los resultados representan el promedio de tres datos \pm desviación estándar.

El extracto de jamaica blanca inhibió ligeramente a *L. sakei* generando un halo de inhibición de 6.3 ± 0.47 mm siendo mayor al de la jamaica roja. Para *L. monocytogenes* también el extracto de jamaica blanca fue mayor teniendo 5 ± 0.47 mm de inhibición. Sin embargo, ninguno de los dos extractos generó inhibición de *Leuconostoc spp.* lo cual pudiera deberse a que la cantidad de extracto que se aplicó no fuese lo suficiente para ver un efecto sobre la bacteria. Otra explicación

puede ser que los extractos perdieron o se degradaron compuestos con actividad antimicrobiana debido al tiempo de almacenamiento antes de realizar la prueba.

Los polifenoles exhiben actividad antimicrobiana, generalmente por la alteración de la función de las membranas celulares bacterianas que retardan el crecimiento o la multiplicación bacteriana. Sin embargo, otros compuestos como la quercetina, podrían actuar esencialmente por inhibición enzimática de la ADN girasa (Cushnie y Lamb, 2005). Los mecanismos de acción de estos compuestos pueden vincularse con la capacidad para alterar la permeabilidad celular microbiana, daño a la membrana citoplasmática y obstruir el sistema de generación de energía celular.

De acuerdo con la actividad antimicrobiana de los extractos de *Hibiscus sabdariffa*, un alto contenido total en compuestos fenólicos, incluyendo flavonoides y antocianinas, no siempre se correlacionan con una alta actividad antibacteriana. Cabe señalar que la actividad antimicrobiana que muestran estos extractos podría adjudicarse a la presencia de compuestos fenólicos específicos en su composición y a la posible existencia de efectos sinérgicos con otros compuestos no fenólicos presentes en los extractos de jamaica. Debido a la gran variedad de compuestos que tienen la jamaica (Zakaria *et al.*, 2015; Formagio *et al.*, 2015) es difícil atribuirle la actividad antimicrobiana a un compuesto en específico o cierto grupo. Por lo tanto, es necesario realizar estudios para determinar que compuesto o que grupo de compuestos son los que le otorgan la actividad antimicrobiana.

7.2 Caracterización de las soluciones poliméricas.

Los resultados de la medición de pH de las distintas soluciones se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. pH de las soluciones poliméricas.

| Solución polimérica | pH |
|----------------------------|--------------------------|
| Control | 4.96 ± 0.10 ^c |
| Jamaica roja | 3.62 ± 0.16 ^b |
| Jamaica blanca | 3.22 ± 0.08 ^a |
| BHT | 5.53 ± 0.09 ^d |

Los resultados representan el promedio de 9 datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa ($P < 0.05$) por Tukey.

Existe diferencia significativa entre los valores de pH de las soluciones poliméricas. Para la solución control el pH fue de 4.96 ± 0.10 relacionado al pH del PVA que normalmente se puede encontrar valores entre 5.0 y 6.5 dependiendo de la concentración a la que se trabaje. Para la solución que contiene extracto de jamaica roja el pH fue de 3.62 ± 0.16 y para el que contiene jamaica blanca de 3.22 ± 0.08 ; estos valores ácidos son congruentes a las propiedades de la jamaica. En contraste, la solución de BHT tuvo un valor de 5.53 ± 0.09 ya que tiene un pH de 6 o inferior.

El pH es una variable importante para el proceso de formación de fibras dentro del electrohilado, ya que para el caso de las proteínas (APA) éste controla las propiedades funcionales entre ellas. Además, el pH puede estar relacionado con la conductividad eléctrica.

Los resultados de la conductividad eléctrica de las diferentes soluciones se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Conductividad eléctrica de las soluciones poliméricas.

| Solución polimérica | Conductividad ($\mu\text{S/cm}$) |
|----------------------------|--|
| Control | 4.184 ± 1.46 ^c |
| Jamaica roja | 2.777 ± 0.44 ^b |
| Jamaica blanca | 4.218 ± 1.22 ^c |
| BHT | 0.593 ± 0.33 ^a |

Los resultados representan el promedio de 6 datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa ($P < 0.05$) por Tukey.

Como se puede observar existe diferencia significativa entre los valores de la conductividad eléctrica de las soluciones poliméricas empleadas. La solución de mayor a menor conductividad eléctrica fue la jamaica blanca, control, jamaica roja y BHT. La conductividad eléctrica puede influir en la morfología de las fibras obtenidas por electrohilado, ya que, a altas conductividades el diámetro de las fibras disminuye mientras que con una conductividad baja no existe un buen alargamiento del jet por la fuerza eléctrica para generar fibras uniformes. Es preferible trabajar con soluciones que presenten una buena conductividad debido a que facilitan el proceso de interacción de cargas.

Hayati *et al.* (1987) mostraron que soluciones muy conductivas son demasiado inestables en presencia de altos campos eléctricos, lo cual afecta la distribución de los diámetros de las fibras. El radio del jet varía inversamente con la raíz cúbica de la conductividad eléctrica de la solución (Bhushani y Anandharamakrishnan, 2014).

Por otro lado, también se observó que existe diferencia significativa entre los valores de viscosidad de las soluciones poliméricas (Tabla 9). Estas diferencias se pueden deber a la mezcla de compuestos que tiene cada solución lo cual cambia ligeramente la movilidad del fluido.

Tabla 9. Viscosidad de las soluciones poliméricas.

| Solución polimérica | Viscosidad (cP) |
|----------------------------|---------------------------|
| Control | 113.5 ± 0.25 ^a |
| Jamaica roja | 132.7 ± 0.41 ^b |
| Jamaica blanca | 151.5 ± 0.49 ^c |
| BHT | 151.4 ± 0.39 ^c |

Los resultados representan el promedio de 6 datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey.

La viscosidad de la solución es importante en la determinación del diámetro y la morfología de las fibras obtenidas por electrohilado, porque se ha informado que con viscosidades muy bajas no hay formación de fibras continuas o se generan grumos, y a altas viscosidades se presentan problemas en la eyección del jet. Se han reportado viscosidades máximas que oscilan desde 1 hasta 215 Poise

(Bhushani y Anandharamakrishnan, 2014). Asimismo, altas viscosidades las soluciones poliméricas normalmente muestran largos tiempos de relajación de tensión, lo cual puede prevenir la fractura del jet eyectados durante el electrohilado.

7.3 Caracterización de las películas obtenidas por electrohilado.

7.3.1 Apariencia física de las películas.

En la Figura 15 se muestran las películas obtenidas mediante electrohilado de las diferentes soluciones poliméricas empleadas.

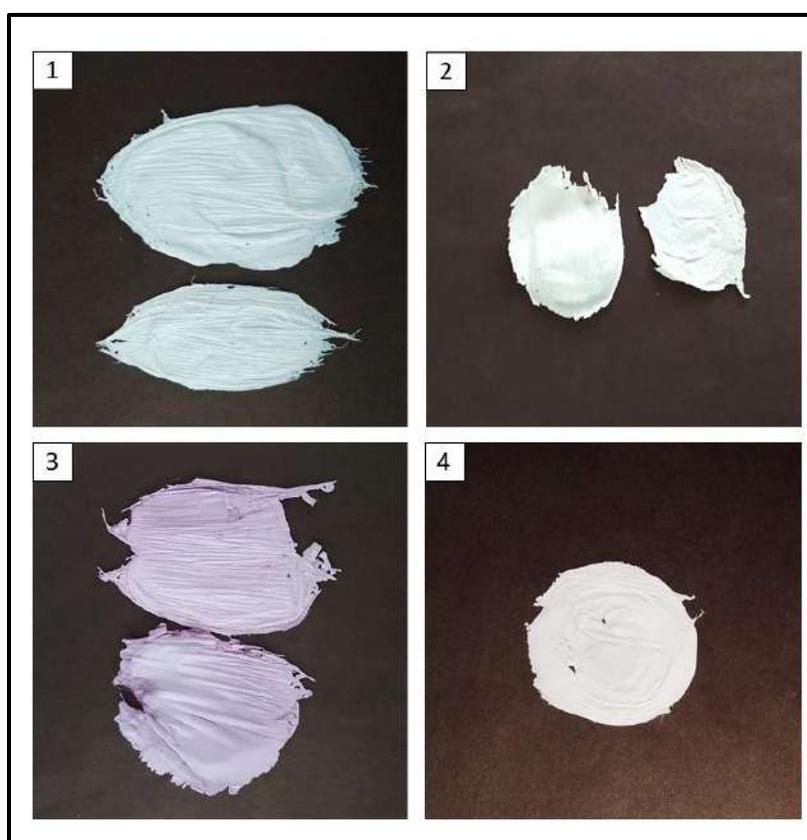


Figura 15. Películas obtenidas por electrohilado: 1) película control, 2) película de jamaica blanca, 3) película de jamaica roja y 4) película de BHT.

7.3.2 Espesor.

Los resultados del espesor de las películas obtenidas por electrohilado se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Espesor de las películas.

| Película | Espesor (mm) |
|-----------------|---------------------|
| Control | 0.068 ± 0.002 |
| Jamaica roja | 0.069 ± 0.001 |
| Jamaica blanca | 0.069 ± 0.002 |
| BHT | 0.069 ± 0.002 |

Los resultados representan el promedio de 10 datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa ($P < 0.05$) por Tukey.

El espesor tiene relevancia debido a que está relacionado con las propiedades mecánicas de las películas. Sabiendo y controlando su valor durante el proceso de formación, es posible identificar si alguna propiedad es beneficiosa o no para su desempeño. Otro factor que pudiera influir en el espesor de las películas es el tiempo en que se electrohila la solución en un mismo punto, ya que a tiempos de ejecución más largos el espesor sería mayor y a tiempos menores sería pequeño, lo cual dificultaría la separación de las fibras del colector.

Como se puede observar en la Tabla 10, no se presentaron diferencias significativas sobre el espesor de las películas. Las películas con jamaica roja, blanca y BHT tuvieron un grosor promedio de 0.069 mm, mientras que la película control fue de 0.068 mm.

Se han reportado estudios de fibras electrohiladas de PVA con nanopartículas de óxido de zinc y quitosano *in situ* de aproximadamente 0.0384 ± 0.0058 mm de espesor medio (flujo: 1-8 $\mu\text{l}/\text{min}$, voltaje: 15-30 kV, distancia: 10-25 cm) (Santiago-Castillo *et al.*, 2021). Estevez-Areco *et al.* (2020) obtuvieron un espesor de 0.015 mm para películas bicapa activas basadas en almidón de yuca que incorporan nanobarras de óxido de zinc y esterillas electrohiladas de PVA que contienen extracto de romero (flujo: 2.2 ml/h, voltaje: 30 kV, distancia: 20 cm).

7.3.3 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de una película es un parámetro importante, debido a que puede influir en las propiedades mecánicas de la película a través del efecto

plastificante del agua. Normalmente las películas con un mayor contenido de humedad pueden ser más flexibles y estirables, lo que permite más opciones de aplicaciones en la industria del envasado de alimentos.

En la Tabla 11 se muestran los resultados del contenido de humedad de las películas obtenidas por electrohilado.

Tabla 11. Contenido de humedad de las películas.

| Película | Humedad (%) |
|-----------------|----------------------------|
| Control | 27.30 ± 3.57 ^b |
| Jamaica roja | 18.45 ± 1.79 ^{ab} |
| Jamaica blanca | 11.96 ± 3.21 ^a |
| BHT | 13.87 ± 3.06 ^a |

Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa ($P < 0.05$) por Tukey.

Los resultados muestran que hay diferencia significativa entre las películas (Tabla 11). La película que presentó mayor contenido de humedad fue la película control seguido de la jamaica roja, BHT y jamaica blanca. Las variaciones en el contenido de humedad se asocian con los componentes de cada solución polimérica.

El aumento observado en el contenido de humedad de las películas de PVA se debe a la inclusión de componentes hidrofílicos. El mayor contenido de humedad se puede asociar a que la mayor parte de la solución polimérica se encontraba en agua, además de que contenía etanol el cual es una sustancia polar que tiene afinidad con el agua. Para la película de jamaica roja puede ser que la presencia de los compuestos del extracto haya cambiado el comportamiento higroscópico y modificado el equilibrio de los sitios hidrofílicos e hidrofóbicos, promoviendo una cantidad de agua absorbida.

Se han reportado trabajos donde se evaluó el contenido de humedad: Estévez-Areco *et al.* (2020) reportaron de 12 ± 0.4 a 13.3 ± 0.6 % de contenido de humedad para películas bicapa activas basadas en almidón de yuca que incorporan nanobarras de óxido de zinc y esterillas electrohiladas de PVA que contienen

extracto de romero. He *et al.* (2019) obtuvieron valores entre 10.2 ± 0.19 a 19.3 ± 0.83 % de contenido de humedad para película de alcohol polivinílico electrohilada que contiene extracto de cáscara de granada y deshidroacetato de sodio.

7.3.4 Color

El color es una propiedad de la materia que se percibe por la luz y es un parámetro importante que caracteriza a un objeto ya que se puede percibir las tonalidades que posee. En la Tabla 12 se presentan los resultados de color de las películas obtenidas por electrohilado.

Tabla 12. Parámetros de color de las películas.

| Película | L* | a* | b* |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Control | 94.77 ± 0.33^a | -0.40 ± 0.02^a | 1.19 ± 0.06^a |
| Jamaica roja | 79.34 ± 1.08^b | 10.76 ± 0.47^b | -5.15 ± 0.09^b |
| Jamaica blanca | 86.20 ± 0.42^c | 0.24 ± 0.09^c | 10.08 ± 0.74^c |
| BHT | 90.96 ± 0.55^d | -0.36 ± 0.01^a | 0.60 ± 0.12^d |

Los resultados representan el promedio de 6 datos \pm desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa ($P < 0.05$) por Tukey.

Con los valores de cada parámetro se obtuvieron los colores base los cuales se muestran en la figura 16.

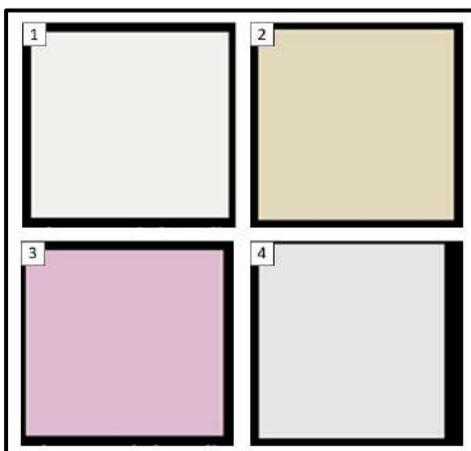


Figura 16. Color base de las películas obtenidas por electrohilado.

La película correspondiente al control y BHT presentaban un color blanco, la película con extracto de jamaica blanca tenía una ligera coloración amarilla, mientras que la película que contenía extracto de jamaica roja mostraba una coloración rosa. Los colores adquiridos por las películas que contenían extracto de jamaica se deben a la naturaleza del extracto y los compuestos fenólicos que le otorgan ese color característico a cada una.

7.3.5 Caracterización microscópica.

Con el objetivo de conocer la formación o entramado de las fibras se llevó a cabo la microscopía electrónica de barrido de todas las películas (Figura 17), las cuales se tomaron a 1000 y 5000X

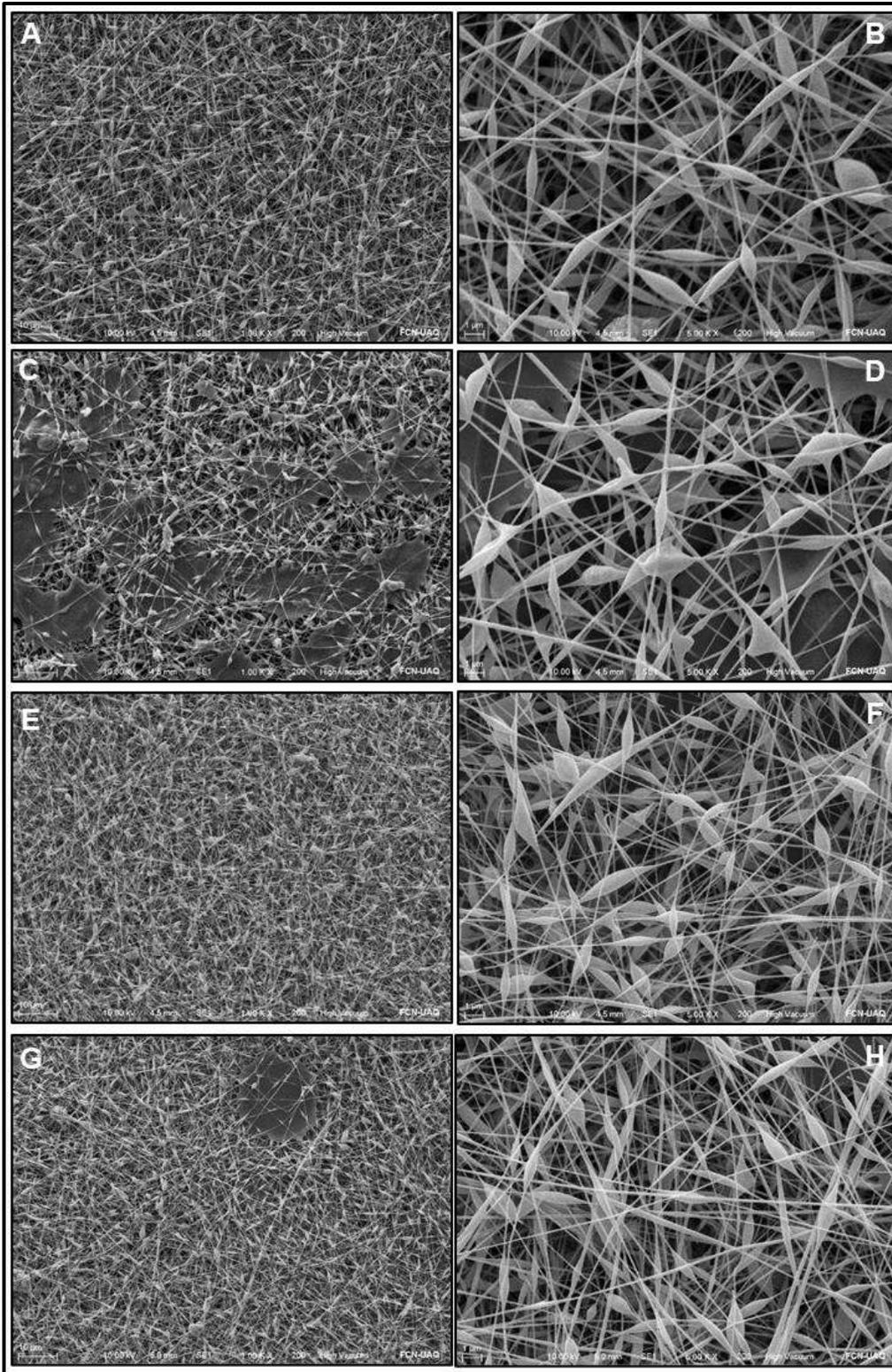


Figura 17. Microscopías de SEM: A) película control a 1000X, B) película control a 5000X, C) película de jamaica blanca a 1000X, D) película de jamaica blanca a 5000X, E) película de jamaica roja a 1000X, F) película de jamaica roja a 5000X, G) película de BHT a 1000X y H) película de BHT a 5000X.

Se obtuvo la formación de fibras lisas y delgadas con la presencia de cuentas (defectos tipo gota) para todas las películas. La película control presentó fibras de un diámetro de 0.142 ± 0.03 nm y cuentas de 0.806 ± 0.0339 nm (Figura 17 B). La película de jamaica blanca mostró fibras de 0.133 ± 0.3 nm y cuentas de 0.823 ± 0.277 nm (Figura 17 D). La película de jamaica roja mostró fibras con un diámetro de 0.098 ± 0.02 nm y cuentas de 0.635 ± 0.165 nm (Figura 17 F). Por último, la película de BHT presentó fibras de un diámetro de 0.110 ± 0.03 nm y cuentas de 0.6 ± 0.135 nm (Figura 17 H). El diámetro de las fibras y cuentas se calculó utilizando el programa ImageJ midiendo el diámetro de 100 fibras y 100 cuentas para cada película; los histogramas de las mediciones de las fibras y las cuentas se muestran en la Figura 18 y la Figura 19, respectivamente.

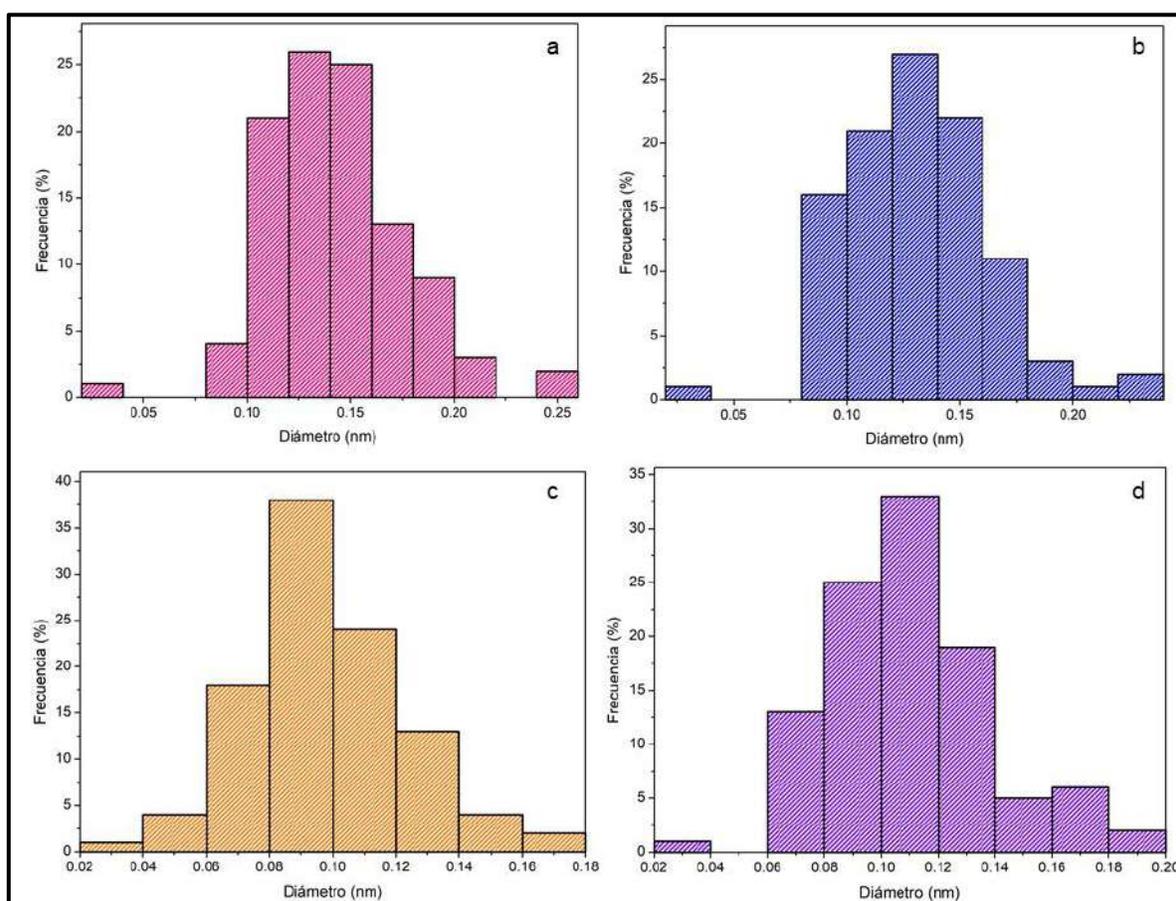


Figura 18. Histogramas del diámetro de las fibras: a) película control, b) película de jamaica blanca, c) película de jamaica roja y d) película de BHT.

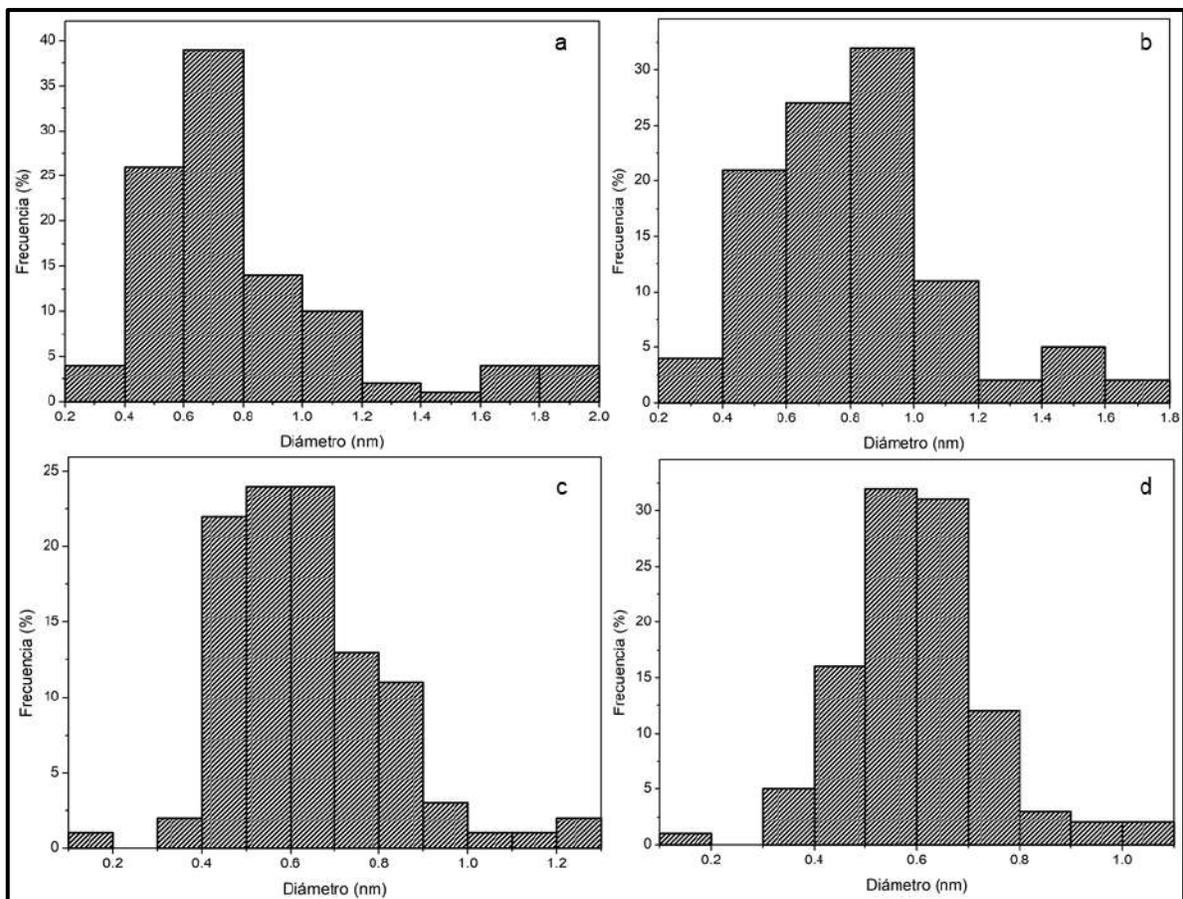


Figura 19. Histogramas del diámetro de los bits: a) película control, b) película de jamaica blanca, c) película de jamaica roja y d) película de BHT.

La presencia de cuentas en las fibras puede deberse a que no hay una buena evaporación del solvente debido a la naturaleza de las soluciones poliméricas, es decir, a los diferentes tipos de compuestos que se encuentran en cada solución (agua, etanol, extracto de jamaica roja y blanca y BHT), a la conductividad eléctrica y la viscosidad de las soluciones. En las microscopías C y G se pueden apreciar ligeras manchas (plastas) que son restos o residuos del polímero (PVA). Estas manchas pueden deberse a que no existe una buena estabilidad en el cono de Taylor cuando se está electrohilando las soluciones poliméricas, lo cual hace que pasen restos del polímero.

Ledezma *et al.* (2014) mencionan que los defectos están asociados a un aumento de carga eléctrica de la solución polimérica, lo cual induce una mayor rapidez para vencer la tensión superficial en el cono de Taylor. Esto se traduce en un aumento en el campo eléctrico, causando una mayor fuerza de estiramiento del jet de la solución polimérica impidiendo la completa evaporación del solvente lo cual hará que se formen gotas o defectos (Haghi y Zaikov, 2013).

La densidad de las cargas netas del chorro de líquido podría ser uno de los factores clave que afectan la formación de perlas (Bhardwaj y Kundu, 2010; Ramakrishna, 2005; Li y Xia, 2004;). La densidad de las perlas podría modificarse alterando la densidad de carga neta del chorro de líquido. Wang *et al.* (2013), observaron presencia de defectos en fibras electrohiladas de aislado proteico de soja con extracto de frambuesa roja ricos en antocianinas mencionando que puede deberse a la conductividad de las sustancias.

Acercas del diámetro de las fibras, en el cual el orden de mayor a menor tamaño fue de la película control, jamaica blanca, BHT y jamaica roja, esto tiene relación con los valores de la conductividad eléctrica y viscosidad de las soluciones poliméricas. A viscosidades altas el diámetro de las fibras normalmente aumenta como es el caso para la jamaica blanca. A altas conductividades los diámetros comúnmente disminuyen, sin embargo, en este trabajo se puede observar que la solución de BHT que fue la que presentó menor conductividad no fue la de menor diámetro. El diámetro de las fibras también puede estar relacionado a la estabilidad que presenta el cono de Taylor y las fuerzas de tensión del jet.

7.3.6 Espectroscopía infrarroja.

En la Figura 20 se muestran los espectros del análisis de infrarrojo de las muestras empleadas. La espectroscopía infrarroja se encarga de medir la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra proporcionando información sobre los grupos funcionales presentes.

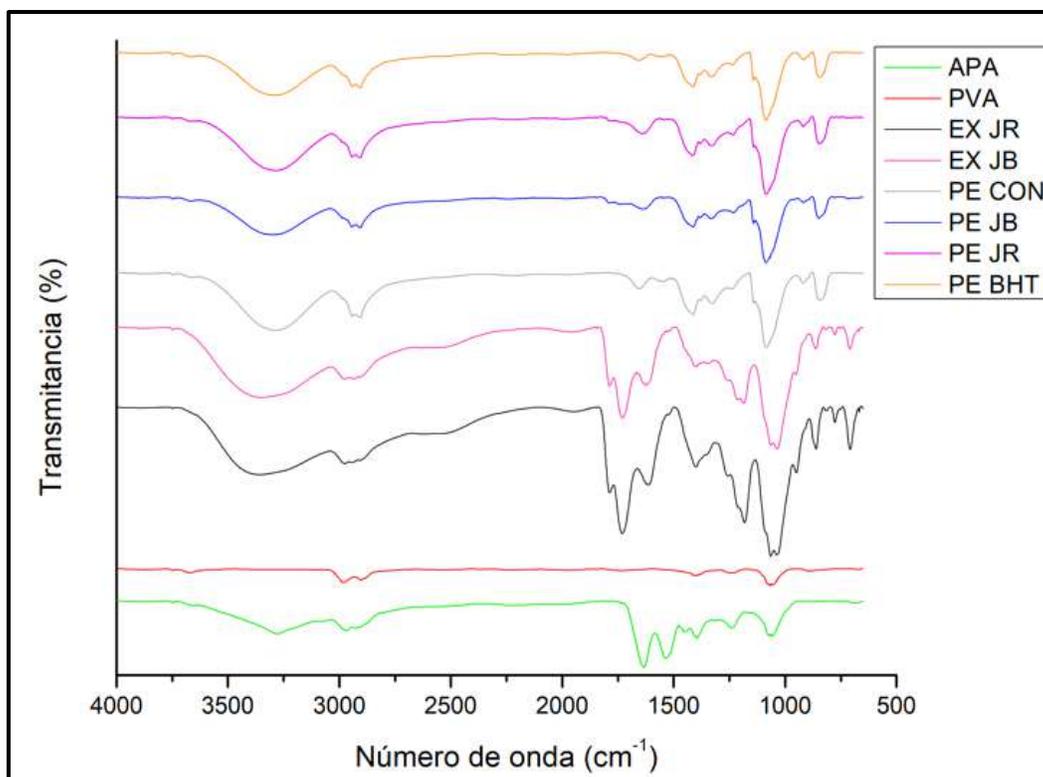


Figura 20. Espectro de infrarrojo de las películas obtenidas por electrohilado. APA: aislado proteico de amaranto, PVA: polivinil alcohol, EX JR: extracto de jamaica roja, EX JB: extracto de jamaica blanca, PE CON: película control, PE JB: película de jamaica blanca, PE JR: película de jamaica roja, PE BHT: película de BHT.

Para el espectro de APA se puede apreciar un comportamiento similar al descrito anteriormente por Aceituno-Medina *et al.* (2013). La banda amida I se presenta entre 1600 y 1700 cm^{-1} que es característica del enlace carbonilo acoplado débilmente al enlace C-N y de flexión del enlace N-H. La banda amida II se presenta entre 1480 y 1575 cm^{-1} . La banda amida A se presenta alrededor de 3290 cm^{-1} .

En el espectro de PVA, la banda cercana a 2940 cm^{-1} se puede asignar a los grupos metileno de PVA, y la banda a 3650 cm^{-1} pueden ser vibraciones de estiramiento de OH. La banda cercana a 1140 cm^{-1} es una de las bandas más importantes que puede mostrar muchos dominios para la reticulación de PVA. Las bandas características de PVA se asignan al estiramiento de OH en el grupo hidroxilo (3000-3600 cm^{-1}), el estiramiento simétrico y asimétrico de CH (2941 cm^{-1}), el estiramiento de CH en el grupo alcohol (1096 cm^{-1}) y la vibración de flexión CH (1328 y 1424

cm⁻¹) (Karthikeyan *et al.*, 2019; Safaee-Ardakani *et al.*, 2019; Estevez-Areco *et al.*, 2018).

En los espectros correspondientes a los extractos de jamaica (roja y blanca) la banda ancha cerca de 3330 cm⁻¹ puede asociarse con vibraciones de estiramiento de OH. La banda cercana a 2980 cm⁻¹ indica la presencia de lípidos-carbohidratos; las bandas en 1785 y 1724 cm⁻¹ se refieren a la presencia de grupos carbonilo (C=O), estiramiento de ésteres (Alara y Abdurahman, 2019). Las bandas entre 2000-1650 cm⁻¹ se pueden deber a grupos de componentes aromáticos. Las bandas cercanas a 700 cm⁻¹ se pueden relacionar a compuestos derivados de benceno.

En los espectros de las cuatro películas se aprecia un patrón similar, sin embargo, algunas bandas presentan una intensidad mayor. Las bandas a 3300 cm⁻¹ se deben a vibraciones de estiramiento de OH relacionados a ácidos carboxílicos. Para la región de 3000-2840 cm⁻¹ se pueden tener vibraciones de estiramiento de CH. En las bandas de 1650 cm⁻¹ se tienen vibraciones de flexión de compuestos aromáticos y de estiramiento de C=O. En las regiones de 1440-1330 cm⁻¹ se pueden tener vibraciones de flexión de OH correspondientes a ácidos carboxílicos y alcoholes, y en las bandas de 1350 cm⁻¹ a fenoles. Para las regiones de 1205-1050 cm⁻¹ se pueden encontrar vibraciones fuertes de estiramiento de CO para alcoholes terciarios, secundarios y primarios. Por último, las bandas a 800 cm⁻¹ se relacionan a vibraciones de flexión de CH. Se pueden apreciar las bandas características de los diferentes componentes de las películas.

7.3.7 Actividad antimicrobiana.

La actividad antimicrobiana de las películas obtenidas por electrohilado se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Actividad antimicrobiana de las películas.

| Película | <i>L. sakei</i> (mm inhibición) | <i>S. Typhimurium</i> (mm inhibición) |
|-----------------|--|--|
| Control | 6.5 ± 0.5 ^a | 6.0 ± 0.0 ^a |
| Jamaica roja | 6.3 ± 0.5 ^a | 6.5 ± 0.0 ^b |
| Jamaica blanca | 6.5 ± 0.5 ^a | 7 ± 0.0 ^c |
| BHT | 6 ± 0.0 ^a | - |

-: no hubo inhibición. Los resultados de actividad inhibitoria son el promedio ± desviación estándar de 6 datos analizados para cada cepa. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey.

Las películas tuvieron efecto de inhibición contra *L. sakei* y *S. Typhimurium*. En relación a la actividad antimicrobiana contra *L. sakei*, la película control y la que contenía jamaica blanca fueron las que mostraron un mayor halo de inhibición de 6.5 ± 0.5 mm. Resultados similares se observaron para *S. Typhimurium* ya que también la película con jamaica blanca fue la que generó el halo de inhibición más grande (7 mm), sin embargo, la película de BHT no generó inhibición.

El PVA es un polímero hidrofílico que se ha utilizado para generar diferentes tipos de películas debido a que tiene facilidad para generar interacciones moleculares. Los enlaces intermoleculares más comunes en el arreglo espacial son los enlaces de hidrógeno entre los grupos OH de cadenas de polímero vecinas. Los sitios sindiotácticos (ambos lados) en estas cadenas son responsables de la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares, mientras que los sitios isotácticos participan principalmente en interacciones intramoleculares (Lozinsky y Plieva, 1998). Por lo anterior, el PVA puede tener un efecto importante de interacción con los diferentes compuestos de las soluciones poliméricas.

La película control presentó efecto de inhibición contra las dos bacterias de prueba. Esto puede deberse a las interacciones generadas entre el PVA y los demás compuestos de la solución polimérica, posiblemente propician que se expongan grupos funcionales no afines a las bacterias provocando un efecto negativo en ellas,

como generar alteraciones en la membrana. También, pudiera ser que quedaron algunos residuos del etanol en la película.

Las películas con jamaica roja y jamaica blanca mostraron efecto de inhibición sobre las dos bacterias evaluadas; sin embargo, la película con jamaica blanca generó ligeramente un mayor efecto inhibitorio en ambos casos. Este efecto de inhibición pudiera atribuirse a los componentes antimicrobianos que contienen los extractos de jamaica, tales como polifenoles, flavonoides y ácidos orgánicos, los cuales se encuentran encapsulados en la película. Existen estudios que han demostrado diferentes propiedades de los extractos de cálices de jamaica como antimicrobiano, antioxidante, antidepresivo, etc. (Zakaria *et al.*, 2015; Formagio *et al.*, 2015).

La película con BHT sólo presentó efecto de inhibición contra *L. sakei*. Los antioxidantes químicos que se utilizan normalmente en la industria cárnica tienen la finalidad de disminuir la rancidez de lípidos y no tanto de reducir el desarrollo microbiano.

7.4 Efecto de la película sobre un producto cárnico.

El pH es uno de los principales factores que influye en la calidad de la carne, ya que modifica las características organolépticas (color, olor, terneza) y es afectado por un sinnúmero de factores que pueden cambiar el pH final. Generalmente, la carne de cerdo con un pH más alto tendrá una calidad superior en comparación con la carne de cerdo con un pH más bajo; sin embargo, el pH puede tener un efecto determinante en la vida útil desde una perspectiva microbiológica y de estabilidad del color (Holmer *et al.*, 2009).

Las películas obtenidas por electrohilado se evaluaron en chuleta ahumada de cerdo para ver el efecto que ejercen en distintos parámetros de calidad del alimento. Los resultados de la medición de pH de la chuleta ahumada de cerdo con las películas electrohiladas se presentan en la Tabla 14 y en la figura 21.

Tabla 14. pH de la carne con las películas durante el almacenamiento a 4 °C.

| Día | Película control | Película jamaica roja | Película jamaica blanca | Película BHT | Carne sin película |
|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 6.51 ± 0.01 ^a | 6.52 ± 0.01 ^a | 6.06 ± 0.01 ^d | 6.33 ± 0.01 ^c | 6.4 ± 0.01 ^b |
| 4 | 6.1 ± 0.02 ^d | 6.22 ± 0.02 ^c | 6.5 ± 0.02 ^a | 6.0 ± 0.01 ^e | 6.29 ± 0.01 ^b |
| 8 | 6.66 ± 0.01 ^b | 6.47 ± 0.02 ^e | 6.73 ± 0.01 ^a | 6.58 ± 0.01 ^c | 6.54 ± 0.01 ^d |
| 12 | 7.48 ± 0.01 ^d | 7.89 ± 0.01 ^b | 8.49 ± 0.01 ^a | 7.5 ± 0.01 ^d | 7.58 ± 0.01 ^c |

Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey (filas).

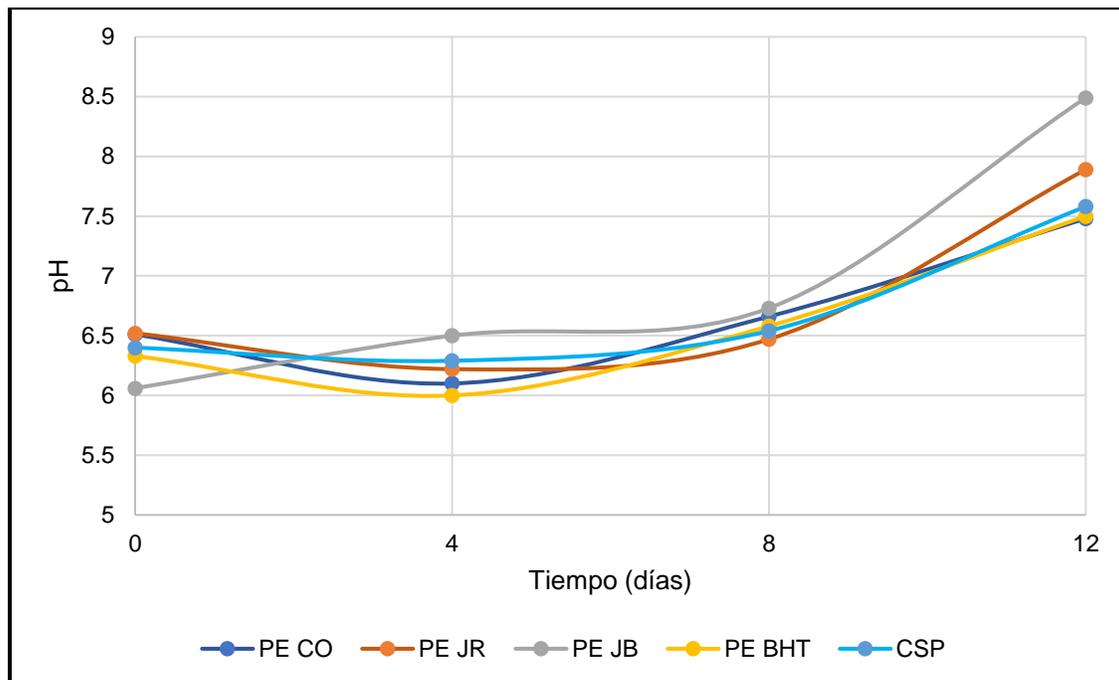


Figura 21. Efecto de las películas sobre el pH de la chuleta ahumada de cerdo durante el almacenamiento a 4 °C. PE CO: película control, PE JR: película de jamaica roja, PE JB: película de jamaica blanca, PE BHT: película de BHT y CSP: carne sin película.

Los resultados presentaron diferencias significativas en todo el almacenamiento (Tabla 14). El rango de pH entre el día 0 y el 12 de almacenamiento de la carne sin película fue de 6.29 - 7.58, de la carne con la película control fue de 6.1 - 7.48, de

la carne con película de jamaica roja de 6.22 - 7.89; la carne con película de jamaica blanca fue de 6.06 - 8.49; y para la carne con película de BHT fue de 6 - 7.5. En el día cero de evaluación la película de jamaica blanca presentó el valor de pH más bajo en comparación con los otros tratamientos, lo cual puede ser debido a los ácidos orgánicos presentes en la flor. En el día cuatro, las películas del control, jamaica roja y BHT presentaron un pH por debajo del valor de pH de la carne sin película. A partir del día 8 el pH de la carne aumentó en todos los tratamientos.

El pH tiene relación con los parámetros de color de la carne, pero existen más factores que interaccionan como lo es el contenido de ciertos componentes químicos básicos en carne y la capacidad de retención de agua (Karamucki *et al.*, 2011). Periago (2013) menciona que durante el almacenamiento de la carne se origina un incremento del pH en las etapas finales, debido al desarrollo de microorganismos proteolíticos, degradación de proteínas y liberación de compuestos nitrogenados.

Epley (2009) señala que durante el proceso de maduración de la carne hay un incremento significativo en el pH, debido a un proceso de degradación de proteínas y a una liberación de iones por parte del retículo sarcoplasmático, todo esto incrementando la presión osmótica de las células musculares.

Con el objetivo de saber cómo se comportaban las películas con respecto al tiempo de almacenamiento se midió el color (Tabla 15).

Tabla 15. Parámetros de color de la carne con las películas durante el almacenamiento 4 °C.

| Día | Película control | Película jamaica roja | Película jamaica blanca | Película BHT | Carne sin película |
|-----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| L* | | | | | |
| 0 | 72.42 ± 0.02 ^a | 50.33 ± 0.04 ^d | 72.22 ± 0.05 ^a | 65.09 ± 0.06 ^c | 68.54 ± 0.04 ^b |
| 4 | 66.52 ± 0.30 ^a | 58.22 ± 1.61 ^c | 63.75 ± 1.14 ^{ab} | 64.03 ± 1.55 ^{ab} | 61.95 ± 0.05 ^b |
| 8 | 64.40 ± 1.52 ^a | 58.38 ± 0.68 ^c | 62.16 ± 0.13 ^b | 63.39 ± 0.61 ^{ab} | 61.69 ± 0.02 ^b |
| 12 | 54.72 ± 0.73 ^c | 51.61 ± 0.44 ^d | 60.42 ± 1.01 ^b | 68.11 ± 2.04 ^a | 51.05 ± 0.61 ^d |
| a* | | | | | |
| 0 | 3.09 ± 0.02 ^d | 7.53 ± 0.02 ^a | 2.01 ± 0.01 ^e | 6.13 ± 0.02 ^c | 6.41 ± 0.03 ^b |
| 4 | 5.50 ± 0.19 ^{bc} | 6.18 ± 0.99 ^b | 4.26 ± 0.87 ^c | 5.51 ± 0.07 ^{bc} | 8.17 ± 0.08 ^a |
| 8 | 5.88 ± 1.79 ^a | 5.98 ± 1.43 ^a | 4.08 ± 0.29 ^a | 5.78 ± 0.33 ^a | 5.84 ± 0.03 ^a |
| 12 | 8.13 ± 0.57 ^a | 3.55 ± 1.74 ^b | 2.02 ± 0.91 ^b | 2.46 ± 1.11 ^b | 8.32 ± 0.26 ^a |
| b* | | | | | |
| 0 | 6.83 ± 0.04 ^c | 7.79 ± 0.02 ^d | 14.30 ± 0.03 ^a | 7.99 ± 0.04 ^b | 8.1 ± 0.04 ^b |
| 4 | 7.14 ± 1.47 ^b | 9.36 ± 0.70 ^{ab} | 11.88 ± 0.73 ^a | 8.34 ± 1.46 ^b | 11.39 ± 0.06 ^a |
| 8 | 11.22 ± 1.18 ^b | 9.24 ± 1.08 ^{bc} | 14.67 ± 1.75 ^a | 7.92 ± 0.37 ^c | 14.52 ± 0.01 ^a |
| 12 | 9.33 ± 0.18 ^{bc} | 8.52 ± 0.93 ^c | 20.63 ± 1.96 ^a | 5.11 ± 0.77 ^d | 11.33 ± 0.29 ^b |

Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey (filas).

El color de la carne se debe al pigmento mioglobina, que está diseñado para unir y almacenar oxígeno en el músculo hasta que se necesita para procesos metabólicos. La mioglobina está compuesta de una proteína (globina) y un grupo que contiene hierro (Lawrie, 2002).

Los valores del parámetro L* que indica el grado de luminosidad, es decir, que tan claro u oscuro es un alimento en la carne sin película y con las películas control y jamaica blanca, sufrieron un decremento durante el almacenamiento. Para la carne con las películas de jamaica roja y BHT el valor del parámetro L* aumentó un poco.

El parámetro a^* indica el grado de enrojecimiento, si tiene un valor positivo tiende al rojo y un valor negativo al verde. En la carne con la película de jamaica blanca, el parámetro a^* mantuvo su valor durante los 12 días, la carne sin película y con la película control presentaron un incremento del día cero al doce, mientras que la carne con las películas de jamaica roja y BHT incrementaron.

Por último, el parámetro b^* , que indica amarillo (valor positivo) o azul (valor negativo), en todos los tratamientos mostró un incremento en su valor a excepción de la carne con la película de BHT, que como se ha mencionado anteriormente ayuda a contrarrestar este tipo de problemas en los productos cárnicos. La carne con la película de jamaica blanca fue la que presentó una coloración más amarilla en comparación con las demás, lo cual pudo deberse a que se trasladó color de la película a la carne, ya que es una de las desventajas que presentan las películas formadas con PVA.

En la Figura 22 se muestra la apariencia de la carne al inicio y al final del tiempo de almacenamiento. Asimismo, en la Figura 23 se presenta el color inicial y final de todos los tratamientos de acuerdo a los valores de cada parámetro.

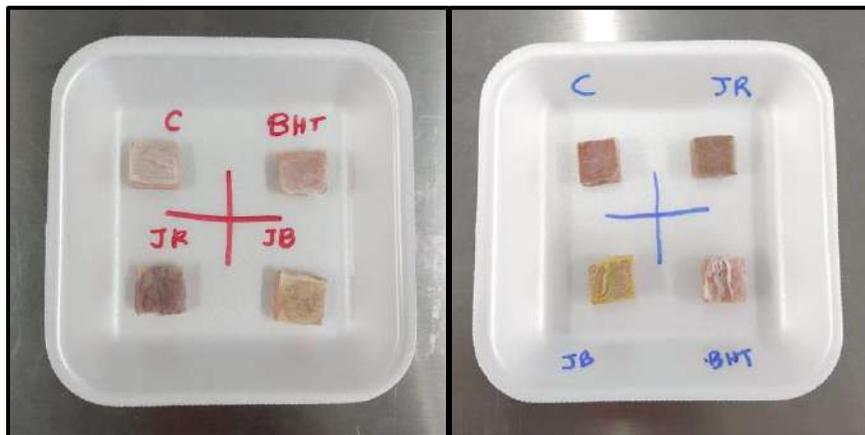


Figura 22. Apariencia de la chuleta con las películas del día inicial (izquierda) y final (derecha) de evaluación.

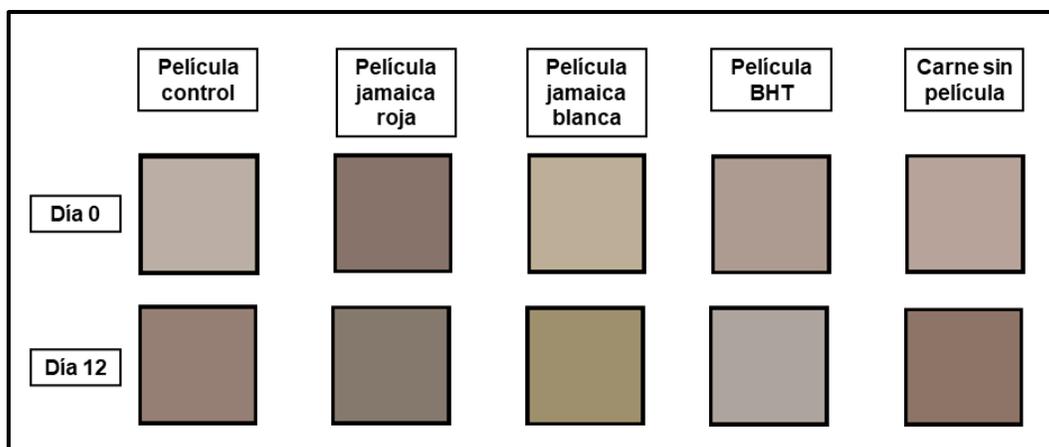


Figura 23. Color base de la chuleta ahumada de cerdo con las películas de cada tratamiento.

El parámetro de color a^* tiende a ser el más importante porqué una reducción en el grado de enrojecimiento hace que el producto cárnico sea menos aceptable para los consumidores. Amensour *et al.* (2010) menciona que en los productos cárnicos el parámetro a^* es afectado por distinto factores tecnológicos (emulsión en frío o caliente, tipo de picado, etc.) y de composición (relación fracción magra/fracción grasa, entre otros).

Existen varios elementos que afectan a la estabilidad del color de la carne, entro de los cuales se encuentra el pH, temperatura, humedad relativa, iluminación, oxidación de lípidos, presión parcial de oxígeno, tipo del músculo, entre otros. Es importante señalar que ningún factor actúa de una manera independiente (Escalante *et al.*, 2008).

Uno de los índices más utilizados para estimar el daño oxidativo a lípidos es la técnica de TBARS, la cual se suele ajustar a cada matriz alimentaria. Los resultados de la medición de TBARS a través del tiempo de almacenamiento de las chuletas de cerdo con las películas se muestran en la Tabla 16 y en la Figura 24.

Tabla 16. Valores de TBARS (mg MDA/kg carne) de la carne durante el tiempo de almacenamiento.

| Día | Película control | Película jamaica roja | Película jamaica blanca | Película BHT | Carne sin película |
|-----|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0 | 2.17 ± 0.03 ^a | 2.19 ± 0.04 ^a | 2.15 ± 0.02 ^a | 2.12 ± 0.06 ^a | 2.13 ± 0.04 ^a |
| 4 | 6.38 ± 0.03 ^a | 5.69 ± 0.10 ^a | 5.11 ± 0.05 ^a | 5.73 ± 0.06 ^a | 5.76 ± 0.04 ^a |
| 8 | 9.81 ± 0.08 ^a | 9.23 ± 0.01 ^a | 8.19 ± 0.03 ^a | 8.04 ± 0.13 ^a | 9.05 ± 0.03 ^a |
| 12 | 12.85 ± 0.02 ^a | 12.32 ± 0.02 ^{ab} | 10.59 ± 0.04 ^c | 11.58 ± 0.06 ^b | 11.97 ± 0.02 ^{ab} |

MDA: malondialdehído. Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey (filas).

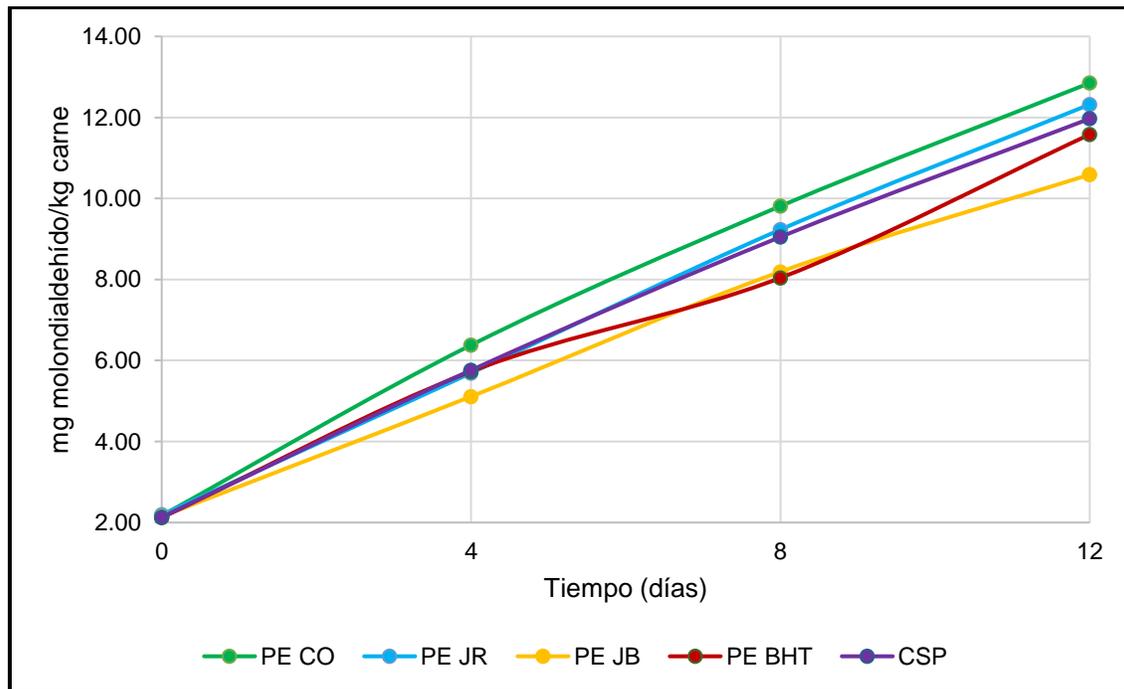


Figura 24. Efecto de las películas sobre TBARS en las chuletas de cerdo: PE CO: película control, PE JR: película de jamaica roja, PE JB: película de jamaica blanca, PE BHT: película de BHT y CSP: carne sin película.

TBARS es una evaluación indirecta del grado de peroxidación lipídica en la carne midiendo el contenido de malondialdehído (MDA), el producto final de la descomposición oxidativa de la grasa en la carne (Wang *et al.*, 2018). En el día cero, cuatro y ocho no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, mientras que en el día doce si existieron; la película control fue diferente contra la película de BHT y jamaica blanca, la película con jamaica roja fue diferente a la de jamaica blanca, la película con jamaica blanca fue diferente a todos los tratamientos, la película con BHT presentó diferencia contra la película control y jamaica blanca y la carne sin película fue diferente a la carne con película de extracto de jamaica blanca.

A lo largo del tiempo de evaluación, el mejor tratamiento, es decir, aquel que mostró una mayor actividad de inhibición en la oxidación de lípidos en la chuleta ahumada de cerdo en comparación con la carne que no se le aplicó ninguna película fue la película de jamaica blanca, seguido de la película de BHT. Esto puede indicar que los compuestos antioxidantes provenientes de esta variedad de jamaica (flavonoides, ácidos orgánicos) que se encuentran encapsulados en la película por el proceso de electrohilado, logran disminuir la oxidación de los lípidos de la chuleta ahumada de cerdo demorando el proceso de rancidez del alimento. La actividad antioxidante de los compuestos fenólicos está asociada con el grupo hidroxilo unido al anillo aromático, que puede donar átomos de hidrógeno con electrones y neutralizar los radicales libres. Este mecanismo bloquea la degradación adicional a formas oxidantes más activas (ejemplo: malondialdehído) (de Oliveira *et al.*, 2012; Baydar *et al.*, 2004).

El BHT como es bien sabido es un antioxidante químico que contrarresta los procesos de oxidación de lípidos en los productos cárnicos, lo cual en este trabajo se pudo constatar que la película con BHT presentó una mejor disminución de malondialdehído que la carne que no tiene película, sin embargo, el empleo de este antioxidante está limitado a ciertas concentraciones por cuestiones de seguridad alimentaria. Para las películas de jamaica roja y control, la cantidad de MDA por kg carne fue mayor en comparación con la carne sin película para el final del periodo de evaluación.

Jokanović *et al.* (2020) reportaron que la aplicación de aceite esencial y extractos de ajedrea (*Satureja montana L.*) sobre chuletas de cerdo precocidas logran disminuir la producción de malondialdehído (aceite esencial 31.53 % y extracto 38.59 %). Wang, Zhang y Ding (2020) demostraron que nanocápsulas de eugenol en gelatina-quitosano aplicadas en carne de cerdo pueden dar un efecto antioxidante reduciendo el contenido de malondialdehído (~35 %). Los resultados obtenidos en este estudio son similares, ya que, se observó que la película con extracto de jamaica blanca logra dar un efecto antioxidante en la chuleta ahumada de cerdo.

El uso de antioxidantes sintéticos es uno de los principales enfoques para prevenir estas reacciones oxidativas y para extender la vida útil de los productos cárnicos (Gómez *et al.*, 2018). Sin embargo, tienen varias connotaciones negativas para la salud, por lo que la industria cárnica moderna está orientada hacia diversas alternativas naturales mientras se enfoca en extractos de plantas y aceites esenciales (Pateiro *et al.*, 2018; Šojić *et al.*, 2019; Šojić *et al.*, 2017). Los extractos de plantas son interesantes ya que están marcados como GRAS (generalmente reconocidos como seguros) y tienen una amplia aceptación entre los consumidores (Kumar *et al.*, 2015; Putnik *et al.*, 2018). Además, con bastante frecuencia son menos costosos y más efectivos que sus contrapartes sintéticas (Šojić *et al.*, 2018).

En relación al efecto antimicrobiano de las películas aplicadas a las chuletas de cerdo, en la Tabla 17 se presentan los resultados.

Tabla 17. Sobrevivencia de *L. sakei* y *L. monocytogenes* en chuleta ahumada de cerdo (log UFC/g).

| Microorganismo | Película | Almacenamiento (días) | | | |
|-------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 0 | 4 | 8 | 12 |
| <i>L. sakei</i> | Control | 5.0 ± 0.04 ^a | 5.0 ± 0.01 ^{ab} | 4.7 ± 0.16 ^{ab} | 4.7 ± 0.33 ^a |
| | Jamaica blanca | 5.1 ± 0.07 ^a | 4.9 ± 0.04 ^b | 4.4 ± 0.24 ^b | 4.9 ± 0.11 ^a |
| | Jamaica roja | 5.1 ± 0.03 ^a | 5.1 ± 0.05 ^a | 4.9 ± 0.03 ^{ab} | 5.0 ± 0.07 ^a |
| | BHT | 5.0 ± 0.05 ^a | 4.9 ± 0.03 ^b | 4.8 ± 0.17 ^{ab} | 4.7 ± 0.15 ^a |
| | Control (+) | 5.0 ± 0.06 ^a | 5.1 ± 0.04 ^a | 5.0 ± 0.19 ^a | 4.7 ± 0.10 ^a |
| <i>L. monocytogenes</i> | Control | 5.4 ± 0.02 ^a | 5.3 ± 0.8 ^a | 5.2 ± 0.02 ^a | 5.1 ± 0.21 ^a |
| | Jamaica blanca | 5.2 ± 0.02 ^b | 5.3 ± 0.02 ^a | 5.1 ± 0.26 ^a | 5.0 ± 0.18 ^a |
| | Jamaica roja | 5.3 ± 0.05 ^{ab} | 5.3 ± 0.02 ^a | 5.0 ± 0.26 ^a | 5.1 ± 0.12 ^a |
| | BHT | 5.4 ± 0.02 ^a | 5.3 ± 0.04 ^a | 5.3 ± 0.06 ^a | 4.9 ± 0.10 ^{ab} |
| | Control (+) | 5.4 ± 0.02 ^a | 5.4 ± 0.04 ^a | 5.2 ± 0.12 ^a | 4.2 ± 0.46 ^b |
| | Control (-) | - | - | - | - |

-.: 0 log UFC/g. Los resultados representan el promedio de tres datos ± desviación estándar. Valores seguidos de la misma letra indica que no existen diferencia significativa (P<0.05) por Tukey (columnas).

Las películas lograron una disminución en la concentración de las bacterias durante el almacenamiento. Para *L. sakei* en el día cero y doce de almacenamiento no se obtuvo diferencia significativa entre los tratamientos, mientras que en los días cuatro y ocho si se presentaron diferencias significativas (Tabla 17). La película control y de BHT fueron los mejores tratamientos logrando disminuir la concentración de la bacteria durante todo el almacenamiento en comparación al control positivo, seguido de las películas con extracto de jamaica. Para el día 8 todas las películas estaban por debajo del valor de la carne que no contenía ninguna película (control +) lo cual manifiesta que existe una disminución en la concentración de *L. sakei*, siendo la película con extracto de jamaica blanca la de mayor reducción.

De igual manera en *L. monocytogenes* se presentaron diferencias significativas en los días cero y doce, mientras que en los días cuatro y ocho no (Tabla 17). La película logro una inhibición mayor para *L. monocytogenes* fue la de BHT. En los primeros 8 días de almacenamiento la carne con la película de jamaica roja fue la que mejor disminuyó la concentración de la bacteria. En ambas bacterias podemos

ver que para el día 12 algunos tratamientos estuvieron por encima de la carne que no contenía ninguna película (control +); esto pudiera ser a que la película se haya desprendido ligeramente de la carne y no cubrió toda la superficie del alimento o que la actividad antimicrobiana de los compuestos del extracto de jamaica disminuyó debido al tiempo de fabricación de las películas. Cabe mencionar que quizás la concentración inicial de inóculo fue alta por lo cual no se ven reducciones más grandes por parte de las películas.

Fonseca *et al.* (2019) reportaron actividad antimicrobiana de nanofibras obtenidas por electrohilado con carvacrol evaluadas sobre *L. monocytogenes*, *S. Typhimurium*, *E. coli* y *S. aureus*. Meral *et al.* (2019) mencionan que nanofibras elaboradas por electrohilado cargadas con nisina y curcumina logran disminuir la concentración de bacterias ácido lácticas en pescado. Los resultados obtenidos en este estudio logran tener un efecto de disminución de las bacterias en algún momento del tiempo de evaluación similar a los estudios anteriores.

La eficacia de los materiales de envasado antimicrobianos depende del tipo, la concentración, las interacciones y la organización tanto de los compuestos antimicrobianos como de los polímeros (Khaneghah *et al.*, 2018). Los compuestos antimicrobianos deben liberarse a una velocidad controlada para mantener su eficacia durante largos períodos y evitar efectos adversos sobre los atributos sensoriales de los productos alimenticios envasados (Khaneghah *et al.*, 2018; Valdés *et al.*, 2017).

VIII. CONCLUSIONES

Se obtuvieron extractos de dos variedades de jamaica con altos valores de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, presentando inhibición contra ciertas bacterias los cuales pudieran emplearse para diferentes aplicaciones dentro de la industria de alimentos.

Las películas que se elaboraron con extracto de jamaica (roja y blanca) mostraron una coloración característica la cual está ligada a los compuestos fenólicos que contienen. Además, se obtuvieron películas muy resistentes las cuales pueden servir como película comestible o empaque para diferentes tipos de alimentos.

Respecto a la hipótesis planteada la cual fue que al utilizar extractos provenientes de jamaica adicionados a una película electrohilada de proteína de amaranto, se puede conservar la calidad sensorial de un producto cárnico, quedó manifestado que con la película que contiene extracto de jamaica blanca se puede disminuir la oxidación lipídica de la chuleta ahumada de cerdo en un 11.5 % en comparación con la carne que no tenía ningún tipo de película aplicada. Asimismo, se puede sugerir un alargamiento de uno a dos días en la vida útil de la chuleta ahumada de cerdo tomando en cuenta los resultados de la sección 7.4, ya que las chuletas que se venden en los supermercados normalmente tienen una vida útil de tres a cinco días.

En esta investigación se sugiere que los compuestos antioxidantes naturales provenientes de la jamaica encapsulados en una película pueden ser eficaces y confiables para poder utilizarlos como agentes que disminuyan la producción de malondialdehído en los productos cárnicos como los antioxidantes químicos comúnmente utilizados. Respecto a la actividad antimicrobiana se pudo observar una ligera disminución de la concentración inicial de las bacterias inoculadas durante el tiempo de evaluación. La película con extracto de jamaica blanca fue la mejor para inhibir *L. sakei*, mientras que la película de jamaica roja para *L. monocytogenes* en los primeros 8 días.

El desarrollo de microorganismos como la oxidación de lípidos son las principales causas de deterioro de los productos cárnicos, produciendo cambios sensoriales en los alimentos. Por lo tanto, al utilizar películas obtenidas por electrohilado adicionadas con extracto de jamaica se podría combatir estos problemas favoreciendo la vida útil de los alimentos.

En la actualidad los consumidores buscan alimentos más sanos y naturales, tratando de disminuir los que contienen compuestos químicos en su elaboración. Este proyecto aporta una nueva alternativa en el área de conservación, ya que fue posible disminuir la rancidez en la chuleta ahumada de cerdo empleando una película con proteína de amaranto y extracto de jamaica obtenida por la técnica de electrohilado. Los resultados de este estudio pueden dar pauta a que se busquen otros tipos de empaques y/o películas para productos cárnicos, cuya finalidad sea mantener los atributos de calidad.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Arab, A. A., Abu-Salem, F. M., & Abou-Arab, E. A. (2011). Physico-chemical properties of natural pigments (anthocyanin) extracted from Roselle calyces (*Hibiscus subdariffa*). *Journal of American Science*, 7(7), 445-456.
- Aceituno-Medina, M., Lopez-Rubio, A., Mendoza, S., & Lagaron, J. M. (2013). Development of novel ultrathin structures based in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolate through electrospinning. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 289-298.
- Aceituno-Medina, M., Mendoza, S., Lagaron, J. M., & López-Rubio, A. (2015). Photoprotection of folic acid upon encapsulation in food-grade amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) protein isolate–pullulan electrospun fibers. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2), 970-975.
- Aceituno-Medina, M., Mendoza, S., Rodríguez, B. A., Lagaron, J. M., & López-Rubio, A. (2015). Improved antioxidant capacity of quercetin and ferulic acid during in-vitro digestion through encapsulation within food-grade electrospun fibers. *Journal of Functional Foods*, 12, 332-341.
- Aguilar-Vázquez, G., Loarca-Piña, G., Figueroa-Cárdenas, J. D., & Mendoza, S. (2018). Electrospun fibers from blends of pea (*Pisum sativum*) protein and pullulan. *Food Hydrocolloids*, 83, 173-181.
- Alara, O. R., & Abdurahman, N. H. (2019). GC–MS and FTIR analyses of oils from *Hibiscus sabdariffa*, *Stigma maydis* and *Chromolaena odorata* leaf obtained from Malaysia: Potential sources of fatty acids . *Chemical Data Collections*, 20, 100200.
- Alehosseini, A., Gómez-Mascaraque, L. G., Martínez-Sanz, M., & López-Rubio, A. (2019). Electrospun curcumin-loaded protein nanofiber mats as active/bioactive coatings for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 87, 758-771.
- Ali, B. H., Wabel, N. A., & Blunden, G. (2005). Phytochemical, pharmacological and toxicological aspects of *Hibiscus sabdariffa* L.: a review. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 19(5), 369-375.
- Alshami, I., & Alharbi, A. E. (2014). *Hibiscus sabdariffa* extract inhibits in vitro biofilm formation capacity of *Candida albicans* isolated from recurrent urinary tract infections. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 4(2), 104-108.

- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 21(2), 106-113.
- Amensour, M., Zapata, E. S., Abrini, J., Nadal, E. S., Barberá, M. E., Vera, d., . . . López, J. F. (2010). Estabilidad del color en salchichas de pollo tipo Frankfurt adicionadas con extracto acuoso de hoja de *Myrtus communis*. *Óptica pura y aplicada*, 43(4), 251-257.
- Arjenaki, N. O., Soltanizadeh, N., & Hamdami, N. (2019). Designing an active phase change material package for thermal and qualitative protection of meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100362.
- Arkoun, M., Daigle, F., Holley, R. A., Heuzey, M. C., & Aji, A. (2018). Chitosan-based nanofibers as bioactive meat packaging materials. *Packaging Technology and Science*, 31(4), 185-195.
- ASTM. (1994). Standard test methods for moisture content of paper and paperboard by oven drying. *In Annual Book of ASTM*, 1-2.
- Aurelio, D. L., Edgardo, R. G., & Navarro-Galindo, S. (2008). Thermal kinetic degradation of anthocyanins in a roselle (*Hibiscus sabdariffa* L. cv. 'Criollo') infusion. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(2), 322-325.
- Ayala-Vargas, C. (2018). Importancia nutricional de la carne. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 54-61.
- Baydar, H., Sağdıç, O., Özkan, G., & Karadoğan, T. (2004). Antibacterial activity and composition of essential oils from *Origanum*, *Thymbra* and *Satureja* species with commercial importance in Turkey. *Food control*, 15(3), 169-172.
- Bellan, L. M., & Craighead, H. G. (2011). Applications of controlled electrospinning systems. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(3), 304-309.
- Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology advances*, 28(3), 325-347.
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*.
- Bhushani, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. *Trends in Food Science & Technology*, 38(1), 21-33.
- Bilbao-Sáinz, C., Avena-Bustillos, R. J., Wood, D. F., Williams, T. G., & McHugh, T. H. (2010). Composite edible films based on hydroxypropyl methylcellulose

- reinforced with microcrystalline cellulose nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), 3753-3760.
- Blanco-Padilla, A., López-Rubio, A., Loarca-Pina, G., Gómez-Mascaraque, L. G., & Mendoza, S. (2015). Characterization, release and antioxidant activity of curcumin-loaded amaranth-pullulan electrospun fibers. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 1137-1144.
- Borrás-Linares, I., Fernández-Arroyo, S., Arráez-Roman, D., Palmeros-Suárez, P. A., Del Val-Díaz, R., Andrade-González, I., & Segura-Carretero, A. (2015). Characterization of phenolic compounds, anthocyanidin, antioxidant and antimicrobial activity of Mexican Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 69, 385-394.
- Borzi, F., Torrieri, E., Wrona, M., & Nerín, C. (2019). Polyamide modified with green tea extract for fresh minced meat active packaging applications. *Food Chemistry*, 300, 125242.
- Carvajal-Zarrabal, O., Barradas-Dermitz, D. M., Orta-Flores, Z., Hayward-Jones, P. M., Nolasco-Hipólito, C., Aguilar-Uscanga, M. G., & Bujang, K. B. (2012). *Hibiscus sabdariffa* L., roselle calyx, from ethnobotany to pharmacology. *Journal of Experimental Pharmacology*, 4, 25.
- Chew, S. Y., Wen, Y., Dzenis, Y., & Leong, K. W. (2006). The role of electrospinning in the emerging field of nanomedicine. *Current Pharmaceutical Design*, 12(36), 4751-4770.
- Chmelík, Z., Šnejdrlová, M., & Vrablík, M. (2019). Amaranth as a potential dietary adjunct of lifestyle modification to improve cardiovascular risk profile. *Nutrition Research*.
- Colla, E., do Amaral Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. (2006). *Amaranthus cruentus* flour edible films: influence of stearic acid addition, plasticizer concentration, and emulsion stirring speed on water vapor permeability and mechanical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(18), 6645-6653.
- Comecarne. (16 de octubre de 2021). *Consejo Mexicano de la Carne*. Obtenido de <https://comecarne.org/compendio-estadistico-2021/>
- Condés, M. C., Añón, M. C., & Mauri, A. N. (2015). Amaranth protein films prepared with high-pressure treated proteins. *Journal of Food Engineering*, 166, 38-44.
- Conforti, F., Statti, G., Loizzo, M. R., Sacchetti, G., Poli, F., & Menichini, F. (2005). In vitro antioxidant effect and inhibition of α -amylase of two varieties of *Amaranthus caudatus* seeds. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 28(6), 1098-1102.

- Cortés, C. E. (28 de marzo de 2016). *El amaranto, planta originaria de México, vigente en el gusto de mexicanos*. Obtenido de Lamsa: <http://www.lamsa.com.mx/index.php/node/1451#:~:text=Las%20zonas%20de%20producci%C3%B3n%20y,6%25%20y%20Guanajuato%202%25.&text=A%20nivel%20mundial%2C%20China%20es,.%2C%20M%C3%A9xico%20con%20900%20has>.
- Cushnie, T. T., & Lamb, A. J. (2005). Antimicrobial activity of flavonoids. *International journal of antimicrobial agents*, 26(5), 343-356.
- Da-Costa-Rocha, I., Bonnlaender, B., Sievers, H., Pischel, I., & Heinrich, M. (2014). Hibiscus sabdariffa L. A phytochemical and pharmacological review. *Food Chemistry*, 165, 424-443.
- Daniloski, D., Petkoska, A. T., Galić, K., Ščetar, M., Kurek, M., Vaskoska, R., & Nedelkoska, D. N. (2019). The effect of barrier properties of polymeric films on the shelf-life of vacuum packaged fresh pork meat. *Meat Science*, 158, 107880.
- de Oliveira, T. L., de Carvalho, S. M., de Araújo Soares, R., Andrade, M. A., das Graças Cardoso, M., Ramos, E. M., & Piccoli, R. H. (2012). Antioxidant effects of *Satureja montana* L. essential oil on TBARS and color of mortadella-type sausages formulated with different levels of sodium nitrite. *LWT-Food Science and Technology*, 45(2), 204-212.
- Deng, L., Kang, X., Liu, Y., Feng, F., & Zhang, H. (2018). Characterization of gelatin/zein films fabricated by electrospinning vs solvent casting. *Food Hydrocolloids*, 74, 324-332.
- Domínguez, R., Barba, F. J., Gómez, B., Putnik, P., Kovačević, D. B., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2018). Active packaging films with natural antioxidants to be used in meat industry: A review. *Food Research International*, 113, 93-101.
- EcoCrop. (2007). *Hibiscus sabdariffa* var. *sabdariffa*. *Food and Agriculture Organization of the UN (FAO)*.
- Edwards, R. J., Moran, N., Devocelle, M., Kiernan, A., Meade, G., Signac, W., & Shields, D. C. (2007). Bioinformatic discovery of novel bioactive peptides. *Nature Chemical Biology*, 3(2), 108-112.
- Elizondo, N. J., Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. (2009). Development of films based on blends of *Amaranthus cruentus* flour and poly (vinyl alcohol). *Carbohydrate Polymers*, 75(4), 592-598.
- Epley, J. (2009). *Aging Beef*. Obtenido de <http://www.extension.umn.edu/distribution/nutrition/DJ5968.html>

- Ersus, S., & Yurdagel, U. (2007). Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray drier. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 805-812.
- Escalante, A. S., Urrutia, G. R., Arriola, J. P., Méndez, N. F., & Watanabe, G. H. (2008). Sistemas combinados de conservación para prolongar la vida útil de la carne y los productos cárnicos. . *Nacameh*, 2(2), 124-159.
- Esfanjani, A. F., & Jafari, S. M. (2016). Biopolymer nano-particles and natural nano-carriers for nano-encapsulation of phenolic compounds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 146, 532-543.
- Eslaminejad, T., & Zakaria, M. (2011). Morphological characteristics and pathogenicity of fungi associated with Roselle (*Hibiscus Sabdariffa*) diseases in Penang, Malaysia. *Microbial Pathogenesis*, 51(5), 325-337.
- Esmer, O. K., Irkin, R., Degirmencioglu, N., & Degirmencioglu, A. (2011). The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat. *Meat science*, 88(2), 221-226.
- Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, C., Escobedo-López, D., De la O-Olán, M., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G., & Hernández-Casillas, J. M. (2010). Conservación y uso de los recursos genéticos de amaranto en México. *Celaya, Guanajuato, México: SINAREFI-INIFAP-UNAM, Centro de Investigación Regional Centro*.
- Estevez-Areco, S., Candal, R., Guz, L., & Goyanes, S. (2018). Release kinetics of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) polyphenols from polyvinyl alcohol (PVA) electrospun nanofibers in several food simulants . *Food Packaging and Shelf Life*, 18, 42-50.
- Estevez-Areco, S., Guz, L., Candal, R., & Goyanes, S. (2020). Active bilayer films based on cassava starch incorporating ZnO nanorods and PVA electrospun mats containing rosemary extract. *Food Hydrocolloids*, 108, 106054.
- Fabra, M. J., López-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2014). Biopolymers for food packaging applications. *In Smart Polymers and Their Applications. Woodhead Publishing*, 476-509.
- FAO. (2014). Carne y productos cárnicos. *Producción y sanidad animal*.
- Fathi, M., Martin, A., & McClements, D. J. (2014). Nanoencapsulation of food ingredients using carbohydrate based delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 18-39.

- Fernández Valdés, D., Bautista Baños, S., Fernández Valdés, D., Ocampo Ramírez, A., García Pereira, A., & Falcón Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3), 52-57.
- Fernández-Arroyo, S., Rodríguez-Medina, I. C., Beltrán-Debón, R., Pasini, F., Joven, J., Micol, V., & Fernández-Gutiérrez, A. (2011). Quantification of the polyphenolic fraction and in vitro antioxidant and in vivo anti-hyperlipemic activities of Hibiscus sabdariffa aqueous extract. *Food Research International*, 44(5), 1490-1495.
- Fonseca, L. M., dos Santos Cruzen, C. E., Bruni, G. P., Fiorentini, Â. M., da Rosa Zavareze, E., Lim, L. T., & Dias, A. R. (2019). Development of antimicrobial and antioxidant electrospun soluble potato starch nanofibers loaded with carvacrol. *International journal of biological macromolecules*, 139, 1182-1190.
- Formagio, A. S., Ramos, D. D., Vieira, M. C., Ramalho, S. R., Silva, M. M., Zárata, N. A., & Carvalho, J. E. (2015). Phenolic compounds of Hibiscus sabdariffa and influence of organic residues on its antioxidant and antitumoral properties. *Brazilian Journal of Biology*, 75, 69-76.
- Forsell, P., Lahtinen, R., Lahelin, M., & Myllärinen, P. (2002). Oxygen permeability of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*, 47(2), 125-129.
- Fukumoto, L. R., & Mazza, G. (2000). Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(8), 3597-3604.
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Lee, Y. S. (2019). Antimicrobial and improved barrier properties of natural phenolic compound-coated polymeric films for active packaging applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16(1), 147-157.
- Geng, X., Kwon, O. H., & Jang, J. (2005). Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution. *Biomaterials*, 26(27), 5427-5432.
- Ghorani, B., & Tucker, N. (2015). Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology. *Food Hydrocolloids*, 51, 227-240.
- Gökoglu, N. (2002). A descriptive method for sensory evaluation of mussels. *LWT-Food Science and Technology*, 35(7), 563-567.

- Gómez, B., Barba, F. J., Domínguez, R., Putnik, P., Kovačević, D. B., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2018). Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 135-147.
- Gorinstein, S., Pawelzik, E., Delgado-Licon, E., Haruenkit, R., Weisz, M., & Trakhtenberg, S. (2002). Characterisation of pseudocereal and cereal proteins by protein and amino acid analyses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 886-891.
- Haghi, A. K., & Zaikov, G. E. (2013). Production of electrospun nanofibers: An Investigation on governing parameters. *Nanopolymers and Modern Materials: preparation, Properties and Applications.*, (CrC Press, Boca Raton Fl, USA, 347 2014).
- Hayati, I., Bailey, A. I., & Tadros, T. F. (1987). Investigations into the mechanisms of electrohydrodynamic spraying of liquids: I. Effect of electric field and the environment on pendant drops and factors affecting the formation of stable jets and atomization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 117(1), 205-221.
- He, L., Lan, W., Ahmed, S., Qin, W., & Liu, Y. (2019). Electrospun polyvinyl alcohol film containing pomegranate peel extract and sodium dehydroacetate for use as food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100390.
- He, L., Xu, H., Liu, X., He, W., Yuan, F., Hou, Z., & Gao, Y. (2011). Identification of phenolic compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) seed residues and investigation into their antioxidant capacities by HPLC–ABTS+ assay. *Food Research International*, 44(5), 1161-1167.
- Higginbotham, K. L., Burris, K. P., Zivanovic, S., Davidson, P. M., & Stewart Jr, C. N. (2014). Aqueous extracts of *Hibiscus sabdariffa* calyces as an antimicrobial rinse on hot dogs against *Listeria monocytogenes* and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Food Control*, 40, 274-277.
- Holmer, S. F., McKeith, R. O., Boler, D. D., Dilger, A. C., Eggert, J. M., Petry, D. B., & Killefer, J. (2009). The effect of pH on shelf-life of pork during aging and simulated retail display. *Meat Science*, 82(1), 86-93.
- Horcada, A. L., & Polvillo, O. (2010). Conceptos básicos sobre la carne. *La Producción de carne en Andalucía*, 113-139.
- Huerta, O. J., Maldonado, C. E., & Barba de la Rosa, A. P. (2012). Amaranto: propiedades benéficas para la salud. *Amaranto; Ciencia y Tecnología. México: INIFAP/SINAREFI*, 303-312.

- Huerta-Ocampo, J. A., & Barba de la Rosa, A. P. (2012). Caracterización bioquímica y estructural de las proteínas de reserva de amaranto. *Amaranto: Ciencia y Tecnología*, 293-302.
- Ijaz, M., Li, X., Zhang, D., Hussain, Z., Ren, C., Bai, Y., & Zheng, X. (2020). Association between meat color of DFD beef and other quality attributes. *Meat Science*, 161, 107954.
- Islam, R. U., Khan, M. A., & Islam, S. U. (2017). Plant derivatives as promising materials for processing and packaging of meat-based products—focus on antioxidant and antimicrobial effects. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(2), e12862.
- Ismail, A., Ikram, E. H., & Nazri, H. S. (2008). Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds—nutritional composition, protein quality and health benefits. *Food*, 2(1), 1-16.
- Jabeur, I., Pereira, E., Barros, L., Calhelha, R. C., Soković, M., Oliveira, M. B., & Ferreira, I. C. (2017). *Hibiscus sabdariffa* L. as a source of nutrients, bioactive compounds and colouring agents. *Food Research International*, 100, 717-723.
- Jaramillo-Guanuche, L. H., & Valarezo-Cruz, K. P. (2021). Evaluación de dos métodos de extracción de compuestos fenólicos en *hibiscus sabdariffa* L., para la formulación de una bebida antioxidante (Bachelor's thesis, Machala: Universidad Técnica de Machala).
- Jenkins, T. L., & Little, D. (2019). Synthetic scaffolds for musculoskeletal tissue engineering: cellular responses to fiber parameters. *NPJ Regenerative medicine*, 4(1), 1-14.
- Jia, B., Zhou, J., & Zhang, L. (2011). Electrospun nano-fiber mats containing cationic cellulose derivatives and poly (vinyl alcohol) with antibacterial activity . *Carbohydrate research*, 346(11), 1337-1341.
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Edible and biodegradable starch films: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2058-2076.
- Jokanović, M., Ivić, M., Škaljac, S., Tomović, V., Pavlić, B., Šojić, B., & Ikonić, P. (2020). Essential oil and supercritical extracts of winter savory (*Satureja montana* L.) as antioxidants in precooked pork chops during chilled storage. *LWT*, 134, 110260.
- Karamucki, T., Gardzielewska, J., Rybarczyk, A., Jakubowska, M., & Natalczyk-Szymkowska, W. (2011). Usefulness of selected methods of colour change measurement for pork quality assessment. *Czech Journal of Food Sciences*, 29(3), 212-218.

- Karim, M. R., Lee, H. W., Kim, R., Ji, B. C., Cho, J. W., Son, T. W., & Yeum, J. H. (2009). Preparation and characterization of electrospun pullulan/montmorillonite nanofiber mats in aqueous solution. *Carbohydrate polymers*, 78(2), 336-342.
- Karthikeyan, B., Hariharan, S., Sasidharan, A., Gayathri, V., Arun, T., Akbari-Fakhrabadi, A., & Madhumitha, C. (2019). Optical, vibrational and fluorescence recombination pathway properties of nano SiO₂-PVA composite films. *Optical Materials*, 90, 139-144.
- Kayaci, F., & Uyar, T. (2012). Electrospun zein nanofibers incorporating cyclodextrins. *Carbohydrate polymers*, 90(1), 558-568, 90(1), 558-568.
- Khaneghah, A. M., Hashemi, S. M., & Limbo, S. (2018). Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial active food packaging: An overview of approaches and interactions. *Food and Bioprocesses Processing*, 111, 1-19.
- Koala, M., Ramde-Tiendrebeogo, A., Ouedraogo, N., Ilboudo, S., Kaboré, B., Kini, F. B., & Ouedraogo, S. (2021). HPTLC Phytochemical Screening and Hydrophilic Antioxidant Activities of *Apium graveolens* L., *Cleome gynandra* L., and *Hibiscus sabdariffa* L. Used for Diabetes Management. *American Journal of Analytical Chemistry*, 12(01), 15.
- Kumar, Y., Yadav, D. N., Ahmad, T., & Narsaiah, K. (2015). Recent trends in the use of natural antioxidants for meat and meat products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 796-812.
- Kurek, M., Hlupić, L., Ščetar, M., Bosiljkov, T., & Galić, K. (2019). Comparison of Two pH Responsive Color Changing Bio-Based Films Containing Wasted Fruit Pomace as a Source of Colorants. *Journal of Food Science*, 84(9), 2490-2498.
- Lawrie, R. (2002). The eating quality of meat. In: *Meat Science*, 5th Edition. Pergamon Press.
- Ledezma, A., Romero, J., Hernández, M., Moggio, I., Arias, E., Padrón, G., & Torres, S. (2014). Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso de nopal (*Opuntia* sp.) y su electrohilado polimérico. *Superficies y vacío*, 27(4), 133-140.
- Leidy, R., & Ximena, Q. C. (2019). Use of electrospinning technique to produce nanofibres for food industries: A perspective from regulations to characterisations. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 92-106.
- Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel? *Advanced materials*, 16(14), 1151-1170.

- Liu, Q., Zhang, M., Bhandari, B., Xu, J., & Yang, C. (2020). Effects of nanoemulsion-based active coatings with composite mixture of star anise essential oil, polylysine, and nisin on the quality and shelf life of ready-to-eat Yao meat products. *Food Control*, 107, 106771.
- López-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2012). Whey protein capsules obtained through electrospraying for the encapsulation of bioactives. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 13, 200-206.
- López-Rubio, A., Sanchez, E., Wilkanowicz, S., Sanz, Y., & Lagaron, J. M. (2012). Electrospinning as a useful technique for the encapsulation of living bifidobacteria in food hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 28(1), 159-167.
- Lorenzo, J. M., & Gómez, M. (2012). Shelf life of fresh foal meat under MAP, overwrap and vacuum packaging conditions. *Meat science*, 92(4), 610-618.
- Lozinsky, V. I., & Plieva, F. M. (1998). Poly (vinyl alcohol) cryogels employed as matrices for cell immobilization. 3. Overview of recent research and developments. *Enzyme and microbial technology*, 23(3-4), 227-242.
- Luis, G. M., Hernández, B. R., Caballero, V. P., López, N. G., Espinoza, V., & Pacheco, L. R. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus* spp.). *Journal of Negative and No Positive Results: JONNPR*, 3(6), 423-436.
- Luvonga, W. A., Njoroge, M. S., Makokha, A., & Ngunjiri, P. W. (2010). Chemical characterisation of Hibiscus sabdariffa (Roselle) calyces and evaluation of its functional potential in the food industry. *In Jkuat Annual Scientific Conference Proceedings*, 631-638.
- Martínez, E. N., & Añón, M. C. (1996). Composition and structural characterization of amaranth protein isolates. An electrophoretic and calorimetric study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(9), 2523-2530.
- Meral, R., Alav, A., Karakas, C., Dertli, E., Yilmaz, M. T., & Ceylan, Z. (2019). Effect of electrospun nisin and curcumin loaded nanomats on the microbial quality, hardness and sensory characteristics of rainbow trout fillet. *Lwt*, 113, 108292113, 108292.
- Mohammadi, H., Kamkar, A., Misaghi, A., Zunabovic-Pichler, M., & Fatehi, S. (2019). Nanocomposite films with CMC, okra mucilage, and ZnO nanoparticles: Extending the shelf-life of chicken breast meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100330.

- Molfino, H., Alcalde-Yañez, A., Valverde-Morón, V., & Villanueva-Salvatierra, D. (2020). Electrospinning: Avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20(4), 706-713.
- Morales, G., Vázquez, M., & Bressani, C. (2009). El amaranto, características físicas, químicas, toxicológicas y funcionales, y aporte nutricio. *Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zuribán*.
- Morales-Cabrera, M., Hernández-Morales, J., Leyva-Rúelas, G., Soto-Rojas, L., & Castro-Rosas, J. (2013). Influence of variety and extraction solvent on antibacterial activity of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) calyxes. *Journal of Medicinal Plants Research*, 7(31), 2319-2322.
- Nenadis, N., Wang, L. F., Tsimidou, M., & Zhang, H. Y. (2004). Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS•+ assay. Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS•+ assay . *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(15), 4669-4674.
- Nzikou, J. M., Bouanga-Kalou, G., Matos, L. G.-P., Mboungou-Mboussi, P. S., Moutoula, F. E., & Desobry, S. (2011). Characteristics and nutritional evaluation of seed oil from Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Congo-Brazzaville . *Current Research Journal of Biological Sciences*, 3(2), 141-146.
- Ojokoh, A. O. (2006). Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) calyx diet and histopathological changes in liver of albino rats. *Pakistan J. Nutr*, 5(2), 110-113.
- Okutan, N., Terzi, P., & Altay, F. (2014). Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers . *Food Hydrocolloids*, 39, 19-26.
- Oloumi, H., Shakeri, S., & Behzadi, M. (2016). Antioxidant activities, polyphenolic composition and their correlation analysis on *Hibiscus sabdariffa* L.(*sabdariffa*) calices . *Journal of Medicinal Herbs*, 7(2), 89-96.
- Panrong, T., Karbowiak, T., & Harnkarnsujarit, N. (2019). Thermoplastic starch and green tea blends with LLDPE films for active packaging of meat and oil-based products. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100331.
- Panseri, S., Martino, P. A., Cagnardi, P., Celano, G., Tedesco, D., Castrica, M., & Chiesa, L. M. (2018). Feasibility of biodegradable based packaging used for red meat storage during shelf-life: A pilot study. *Food Chemistry*, 249, 22-29.
- Pateiro, M., Vargas, F. C., Chinchá, A. A., Sant'Ana, A. S., Strozzi, I., Rocchetti, G., & Lorenzo, J. M. (2018). Guarana seed extracts as a useful strategy to extend the shelf life of pork patties: UHPLC-ESI/QTOF phenolic profile and impact

- on microbial inactivation, lipid and protein oxidation and antioxidant capacity. *Food Research International*, 114, 55-63.
- Periago, M. J. (2013). Técnicas analíticas en carne y productos cárnicos. *Higiene, inspección y control alimentario*.
- Pettersen, M. K., Mielnik, M. B., Eie, T., Skrede, G., & Nilsson, A. (2004). Lipid oxidation in frozen, mechanically deboned turkey meat as affected by packaging parameters and storage conditions. *Poultry Science*, 83(7), 1240-1248.
- Pirsa, S., & Shamusli, T. (2019). Intelligent and active packaging of chicken thigh meat by conducting nano structure cellulose-polypyrrole-ZnO film. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 798-809.
- Plotto, A. (2004). Hibiscus: post-production management for improved market access. *Food and Agriculture Organization of the UN (FAO)*.
- Putnik, P., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Roohinejad, S., Režek Jambrak, A., Granato, D., & Bursać Kovačević, D. (2018). Novel food processing and extraction technologies of high-added value compounds from plant materials. *Foods*, 7(7), 106.
- Ramakrishna, S. (2005). *An introduction to electrospinning and nanofibers*. World scientific.
- Reséndiz-Cruz, V., Ramírez-Bribiesca, E., & Guerrero-Legarreta, I. (2013). Empaque para la conservación e carne y productos cárnicos. *Agroproductividad*, 10-16.
- Riaz, G., & Chopra, R. (2018). A review on phytochemistry and therapeutic uses of Hibiscus sabdariffa L. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 102, 575-586.
- Rios-Mera, J. D., Saldaña, E., Ramírez, Y., Auquiñivín, E. A., Alvim, I. D., & Contreras-Castillo, C. J. (2019). Encapsulation optimization and pH-and temperature-stability of the complex coacervation between soy protein isolate and inulin entrapping fish oil. *LWT Food Science and Technology*, 116, 108555.
- Robert, P., Zamorano, M., González, E., Silva-Weiss, A., Cofrades, S., & Giménez, B. (2019). Double emulsions with olive leaves extract as fat replacers in meat systems with high oxidative stability. *Food Research International*, 120, 904-912.
- Ross, I. A. (2003). *Hibiscus sabdariffa*. In *Medicinal plants of the world* (pp. 267-275). Totowa, NJ: Humana Press.

- Safae-Ardakani, M. R., Hatamian-Zarmi, A., Sadat, S. M., Mokhtari-Hosseini, Z. B., Ebrahimi-Hosseinzadeh, B., Rashidiani, J., & Kooshki, H. (2019). Electrospun Schizophyllan/polyvinyl alcohol blend nanofibrous scaffold as potential wound healing. *International journal of biological macromolecules*, 127, 27-38.
- Sánchez, L. D., Rodríguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: la era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(1), 10-27.
- Sani, H. A., Rahmat, A., Ismail, M., Rosli, R., & Endrini, S. (2004). Potential anticancer effect of red spinach (*Amaranthus gangeticus*) extract. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 13(4).
- Santiago-Castillo, K., Del Angel-López, D., Torres-Huerta, A. M., Domínguez-Crespo, M. A., Palma-Ramírez, D., Willcock, H., & Brachetti-Sibaja, S. B. (2021). Effect on the processability, structure and mechanical properties of highly dispersed in situ ZnO:CS nanoparticles into PVA electrospun fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 929-945.
- Saricaoglu, F. T., & Turhan, S. (2019). Performance of mechanically deboned chicken meat protein coatings containing thyme or clove essential oil for storage quality improvement of beef sucuks. *Meat Science*, 158, 107912.
- Sáyago-Ayerdi, S. G., Arranz, S., Serrano, J., & Goñi, I. (2007). Dietary fiber content and associated antioxidant compounds in roselle flower (*Hibiscus sabdariffa* L.) beverage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(19), 7886-7890.
- Shin, S. H., Purevdorj, O., Castano, O., Planell, J. A., & Kim, H. W. (2012). A short review: Recent advances in electrospinning for bone tissue regeneration. *Journal of tissue engineering*, 3(1), 2041731412443530.
- Shrivastava, S., & Dash, D. (2012). Nanotechnology in food sector and agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological sciences*, 82(1), 29-35.
- Sill, T. J., & Von Recum, H. A. (2008). Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 29(13), 1989-2006.
- Sindi, H., Marshall, L., & Morgan, M. (2014). Análisis químico y bioquímico comparativo de extractos de *Hibiscus sabdariffa*. *Química de los alimentos*, 164, 23-29.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.

- Šojić, B., Pavlić, B., Tomović, V., Ikonić, P., Zeković, Z., Kocić-Tanackov, S., & Ivić, M. (2019). Essential oil versus supercritical fluid extracts of winter savory (*Satureja montana* L.)—Assessment of the oxidative, microbiological and sensory quality of fresh pork sausages. *Food chemistry*, 287, 280-286.
- Šojić, B., Pavlić, B., Zeković, Z., Tomović, V., Ikonić, P., Kocić-Tanackov, S., & Džinić, N. (2018). The effect of essential oil and extract from sage (*Salvia officinalis* L.) herbal dust (food industry by-product) on the oxidative and microbiological stability of fresh pork sausages. *LWT*, 89, 749-755.
- Šojić, B., Tomović, V., Jokanović, M., Ikonić, P., Džinić, N., Kocić-Tanackov, S., & Šojić, N. Ž. (2017). Antioxidant activity of *Juniperus communis* L. essential oil in cooked pork sausages. *Czech Journal of Food Sciences*, 35(3), 189-193.
- Song, Y., & Zheng, Q. (2014). Ecomaterials based on food proteins and polysaccharides. *Polymer Reviews*, 54(3), 514-571.
- Soto, K. M., Hernández-Iturriaga, M., Loarca-Piña, G., Luna-Bárcenas, G., & Mendoza, S. (2019). Antimicrobial effect of nisin electrospun amaranth: pullulan nanofibers in apple juice and fresh cheese. *International Journal of Food Microbiology*, 295, 25-32.
- Soto, K., Hernández-Iturriaga, M., Loarca-Piña, G., Luna-Bárcenas, G., Gómez-Aldapa, C. A., & Mendoza, S. (2016). Stable nisin food-grade electrospun fibers. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3787-3794.
- Souza, V. G., Pires, J. R., Vieira, É. T., Coelho, I. M., Duarte, M. P., & Fernando, A. L. (2019). Activity of chitosan-montmorillonite bionanocomposites incorporated with rosemary essential oil: From in vitro assays to application in fresh poultry meat. *Food Hydrocolloids*, 89, 241-252.
- Swarnalatha, B., Nair, S. L., Shalumon, K. T., Milbauer, L. C., Jayakumar, R., Paul-Prasanth, B., & Nair, S. V. (2013). Poly (lactic acid)–chitosan–collagen composite nanofibers as substrates for blood outgrowth endothelial cells. *International journal of biological macromolecules*, 58, 220-224.
- Takma, D. K., & Korel, F. (2019). Active packaging films as a carrier of black cumin essential oil: Development and effect on quality and shelf-life of chicken breast meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 210-217.
- Tampau, A., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2018). Release kinetics and antimicrobial properties of carvacrol encapsulated in electrospun poly-(ϵ -caprolactone) nanofibres. Application in starch multilayer films. *Food Hydrocolloids*, 79, 158-169.

- Tapia-Blácido, D. R., Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. (2010). Potential of *Amaranthus cruentus* BRS Alegria in the production of flour, starch and protein concentrate: chemical, thermal and rheological characterization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(7), 1185-1193.
- Tapia-Blácido, D., Mauri, A. N., Menegalli, F. C., Sobral, P. J., & Añón, M. C. (2007). Contribution of the starch, protein, and lipid fractions to the physical, thermal, and structural properties of amaranth (*Amaranthus caudatus*) flour films. *Journal of Food Science*, 72(5), E293-E300.
- Tapia-Blácido, D., Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. (2005). Development and characterization of biofilms based on Amaranth flour (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 215-223.
- Tarladgis, B. G. (1960). A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 37(1), 44-48.
- Tsai, P. J., McIntosh, J., Pearce, P., Camden, B., & Jordan, B. R. (2002). Anthocyanin and antioxidant capacity in Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract. *Food Research International*, 35(4), 351-356.
- Valdés, A., Ramos, M., Beltrán, A., Jiménez, A., & Garrigós, M. C. (2017). State of the art of antimicrobial edible coatings for food packaging applications. *Coatings*, 7(4), 56.
- Vilarinho, F., Andrade, M., Buonocore, G. G., Stanzione, M., Vaz, M. F., & Silva, A. S. (2018). Monitoring lipid oxidation in a processed meat product packaged with nanocomposite poly (lactic acid) film. *European Polymer Journal*, 98, 362-367.
- Vytejšková, S., Vápenka, L., Hradecký, J., Dobiáš, J., Hajšlová, J., Lorient, C., & Poustka, J. (2017). Testing of polybutylene succinate based films for poultry meat packaging. *Polymer Testing*, 60, 357-364.
- Wang, M. L., Morris, B., Tonnis, B., Davis, J., & Pederson, G. A. (2012). Assessment of oil content and fatty acid composition variability in two economically important *Hibiscus* species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(26), 6620-6626.
- Wang, Q., Wang, J., Ding, W., Zhang, D., Reed, K., & Zhang, B. (2018). Alternatives to carcinogenic preservatives in Chinese Sausage-Sorbic acid-loaded chitosan/tripolyphosphate nanoparticles. *International journal of biological macromolecules*, 120, 28-33.

- Wang, Q., Zhang, L., & Ding, W. (2020). Eugenol nanocapsules embedded with gelatin-chitosan for chilled pork preservation. *International journal of biological macromolecules*, 158, 837-844.
- Wang, S., Marcone, M. F., Barbut, S., & Lim, L. T. (2013). Electrospun soy protein isolate-based fiber fortified with anthocyanin-rich red raspberry (*Rubus strigosus*) extracts. *Food research international*, 52(2), 467-472.
- Wang, S., Sun, Z., Yan, E., Yuan, J., Gao, Y., Bai, Y., & Jing, T. (2014). Magnetic composite nanofibers fabricated by electrospinning of Fe₃O₄/gelatin aqueous solutions. *Materials Science and Engineering: B*, 190, 126-132.
- Yang, L., Gou, Y., Zhao, T., Zhao, J., Li, F., Zhang, B., & Wu, X. (2012). Antioxidant capacity of extracts from calyx fruits of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 11(17), 4063-4068.
- Zakaria, F., Prangdimurti, E., & Damanik, R. (2015). Anti-inflammatory of purple roselle extract in diabetic rats induced by streptozotocin. *Procedia Food Science*, 3, 182-189.
- Zhai, X., Zou, X., Shi, J., Huang, X., Sun, Z., Li, Z., & Gong, Y. (2020). Amine-responsive bilayer films with improved illumination stability and electrochemical writing property for visual monitoring of meat spoilage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 302, 127130.
- Zhen, J., Villani, T. S., Guo, Y., Qi, Y., Chin, K., Pan, M. H., & Wu, Q. (2016). Phytochemistry, antioxidant capacity, total phenolic content and anti-inflammatory activity of *Hibiscus sabdariffa* leaves. *Food Chemistry*, 190, 673-680.
- Zipser, M. W., Dupont, J., & Watts, B. M. (1962). Extraction of Lipids from Oxidizing Mullet a. *Journal of Food Science*, 27(2), 135-138.

