



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“Irradiación de luz UV-C e infiltración ultrasónica de
nanocápsulas de aceite esencial de romero en fajitas de
pollo refrigeradas”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA

ALEJANDRA HIGUERA PARRA

ASESORES:

**DRA. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA
I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO. 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

- Al proyecto PAPIIT IT201617, “Efecto de recubrimientos nanoparticulados y tratamiento con luz UV-C sobre la actividad antioxidante, enzimática e integridad de frutas y hortalizas cortadas” de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM), por el financiamiento para la realización de este trabajo.
- Al proyecto PIAPI 1801 “Evaluación y diseño de sistemas nanoparticulados para la conservación refrigerada y/o congelada de productos de origen vegetal. Proyecto interno de FES-Cuautitlán-UNAM, por el apoyo en la adquisición de reactivos para el desarrollo de este trabajo.
- Alejandra Higuera Parra agradece el apoyo técnico para la realización de pruebas colorimétricas, fisicoquímicas y texturales de la Dra. María de los Ángeles Cornejo Villegas, en el Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos de la UIM.

LUGAR DE REALIZACIÓN

Este trabajo se realizó en la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos L-16, Campo IV FES-Cuautitlán-UNAM.

A DIOS, por estar siempre presente en mi vida, guiar mi camino y ayudarme a ser mejor persona cada día.

A mis padres JESÚS ALBERTO HIGUERA ACUÑA y ALEJANDRA PARRA ACEVEDO, gracias por todo el apoyo que me han dado, por su amor y, en especial, por ayudarme a alcanzar esta meta. Gracias por motivarme e impulsarme a superarme y ser mejor cada día, son mi ejemplo a seguir y sin ustedes no estaría aquí.

A mi hermana SUSANA HIGUERA PARRA, por todos los momentos juntas y por estar en mi vida, eres mi inspiración. Y a mis hermanos de corazón FRANCISCO JAVIER HIGUERA ORDUÑO y MÓNICA VALENZUELA HIGUERA, por todos los momentos juntos. Los quiero mucho.

A mis abuelitos GILBERTO PARRA y LUPITA ACEVEDO, gracias por creer en mí, por sus consejos y su apoyo. Y a mis abuelos URBANO HIGUERA† y MARÍA DEL CARMEN ACUÑA†, sé que nos siguen cuidando desde el cielo.

A ESTEBAN, gracias por estar conmigo y brindarme tu apoyo incondicional en esta etapa. Gracias por tus consejos y tu amor. Eres mi persona favorita.

A la Dra. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA y al I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS, gracias por sus enseñanzas, por compartir sus conocimientos y ayudarme a crecer académicamente. Por su apoyo, tiempo y consejos durante la realización de este trabajo, gracias por ayudarme a alcanzar esta meta.

A mis sinodales I.B.Q. LETICIA FIGUEROA VILLAREAL, I.A. MARÍA GUADALUPE LÓPEZ FRANCO, Dra. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA, I.A. VERÓNICA ROMERO ARREOLA y al I.A. ARTURO MUNGUÍA SÁNCHEZ, gracias por su tiempo, dedicación y apoyo durante esta etapa.

A los profesores de la carrera, gracias por sus enseñanzas dentro y fuera del salón de clases. Esto se los debo a ustedes que me motivaron a alcanzar mis metas y a superarme: VICTOR ÁVALOS ÁVILA†, LAURA CORTAZAR FIGUEROA, MANUEL ALARCÓN LÓPEZ, JOSÉ JAIME FLORES MINUTTI, JUANITA GUTIERREZ BAUTISTA y FRANCISCO JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ.

A mis amigos: BRENDA, SARA, ANDY, JERRY, BREN A., FIDEL, KENIA, ARY, CRISTI, KARLY, DESSIRÉ, ARTURO, JUNUEN, CLAUDIA, JIME, gracias por hacer de la universidad la mejor etapa. Por brindarme su amistad, apoyo y compañerismo. Admiro y quiero mucho a cada uno de ustedes.

A la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO** y a la FES Cuautitlán, gracias por darme la oportunidad de estudiar, desarrollarme y formarme como profesionista, por las enseñanzas, emociones y experiencias. Estoy orgullosa de formar parte de la máxima casa de estudios en México y de ser Ingeniera en Alimentos.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis.**

Irradiación de luz UV-C e infiltración ultrasónica de nanocápsulas de aceite esencial de romero en fajitas de pollo refrigeradas.

Que presenta la pasante: **Alejandra Higuera Parra**
Con número de cuenta: **312580616** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de Febrero de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. Leticia Figueroa Villarreal	
VOCAL	I.A. María Guadalupe López Franco	
SECRETARIO	Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza	
1er. SUPLENTE	I.A. Verónica Romero Arreola	
2do. SUPLENTE	I.A. Arturo Munguía Sánchez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	
1.1. Carne de pollo	1
1.1.1. Parámetros de calidad de carne de pollo fresca	4
1.1.2. Deterioro de la carne de pollo	9
1.1.3. Marinado de pechuga de pollo	10
1.1.4. Métodos de conservación de pechuga de pollo fresca	11
1.1.5. Almacenamiento en refrigeración de pechuga de pollo	12
1.2. Tecnologías emergentes en la conservación de alimentos	14
1.2.1. Irradiación de luz ultravioleta (UV-A, UV-B y UV-C)	15
1.2.1.1. Tratamiento con luz UV-C	16
1.2.1.2. Efecto de la irradiación UV-C en alimentos	17
1.2.2. Procesamiento ultrasónico	18
1.2.2.1. Principios de operación de ultrasonido	20
1.2.2.2. Influencia del ultrasonido en la eficiencia de marinado	21
1.3. Nanotecnología en alimentos	23
1.3.1. Nano encapsulación de aceites esenciales	25
1.3.2. Aceite esencial de romero	26
1.4. Envasado a vacío	28
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	
2.1. Problemática	30
2.2. Objetivos	31
2.2.1. Objetivo General	31
2.2.2. Objetivos Particulares	31
2.3. Cuadro metodológico	32
2.4. Actividades preliminares	33
2.4.1. Acondicionamiento de la cámara de luz ultravioleta	33
2.4.2. Acondicionamiento de la cámara de refrigeración	34
2.4.3. Determinación de condiciones en ultrasonido	34
2.4.4. Selección de la materia prima (pechuga de pollo)	35
2.4.5. Rendimiento másico del producto	35
2.4.6. Preparación del marinado	35
2.4.7. Preparación de muestras y tratamientos	35

2.5.	Diseño Experimental	37
2.5.1.	Variables	37
2.5.2.	Justificación de variables	38
2.5.3.	Análisis estadístico	38
2.6.	Métodos y técnicas de control	39
2.6.1.	Evaluación del color	39
2.6.2.	Pérdida de peso	40
2.6.3.	Líquido drenado	40
2.6.4.	Resistencia al corte	41
2.6.5.	Prueba de punción	41
2.6.6.	Capacidad de retención de agua	42
2.6.7.	Determinación de actividad de agua	43
2.6.8.	Determinación de pH	43
2.6.9.	Determinación del porcentaje de ácido láctico	43
2.6.10.	Determinación de conductividad eléctrica	44

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.	Resultados actividades preliminares	45
3.1.1.	Acondicionamiento de la cámara de luz ultravioleta	45
3.1.2.	Acondicionamiento de la cámara de refrigeración	45
3.1.3.	Determinación del rendimiento másico del producto	46
3.2.	Resultados experimentales de los parámetros de calidad físicos, fisicoquímicos y texturales	47
3.2.1.	Evaluación del color	48
3.2.1.1.	Luminosidad	48
3.2.1.2.	Cromaticidad	52
3.2.1.3.	Ángulo de tonalidad (°Hue)	54
3.2.2.	Evaluación de la pérdida de peso	57
3.2.2.1.	Pérdida de peso durante el almacenamiento	58
3.2.2.2.	Pérdida de peso por cocción	59
3.2.3.	Determinación del líquido drenado	61
3.2.4.	Resistencia al corte	64
3.2.5.	Prueba de punción	67
3.2.6.	Capacidad de retención de agua	70
3.2.7.	Determinación de actividad de agua	73
3.2.8.	Determinación de pH	76
3.2.9.	Determinación del porcentaje de ácido láctico	79
3.2.10.	Determinación de conductividad eléctrica	81

CONCLUSIONES	84
--------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
----------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Estados productores de pollo en México (Unión Nacional de Avicultores, 2014).	3
2.	Pechuga de pollo fresca (Informe Pastrán, 2017).	5
3.	Cuadro metodológico.	32
4.	Esquema de distribución de la muestra en la cámara de UV.	33
5.	Cámara de refrigeración, esquema de posiciones de medición.	34
6.	Envasadora <i>Multivac</i> ®.	36
7.	Envasado a vacío del producto.	37
8.	Prueba de resistencia al corte de fajitas de pollo.	41
9.	Prueba de punción a fajitas de pollo.	41
10.	Prueba de capacidad de retención de agua de fajitas de pollo en texturómetro.	42
11.	Cámara de luz ultravioleta y posición de las muestras.	46
12.	Gráfica de temperatura y humedad relativa registrados por el termohigrómetro.	47
13.	Cambios de luminosidad por efecto de los tratamientos aplicados en la conservación de fajitas de pollo a 2°C.	49
14.	Cambios en la saturación del color (croma) de fajitas de pollo a diferentes tratamientos.	52
15.	Escala de ángulo de color o Hue (Konica Minolta, s/a).	55
16.	Cambios en el ángulo Hue de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.	56
17.	Porcentaje de líquido drenado de las fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.	63
18.	Cambios en la resistencia al corte de las fajitas de pollo almacenadas a 2 °C.	65
19.	Cambios en la firmeza de las fajitas de pollo evaluada en la prueba de punción.	68
20.	Cambios en la CRA de las fajitas con diferentes tratamientos y días de almacenamiento.	70

21.	Cambios en la a_w de fajitas de pollo con diferentes tratamientos en su almacenamiento a 2°C.	73
22.	Cambios en el pH en fajitas con diferentes tratamientos y almacenadas a 2°C.	76
23.	Cambios en el porcentaje de ácido láctico de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.	79
24.	Cambios en la conductividad eléctrica de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Composición media proximal por cada 100 g de carne de pechuga de pollo (USDA, 2018).	2
2.	Parámetros de calidad de la carne de pollo (Gómez et al. 2013).	7
3.	Factores y niveles de variación involucrados en el diseño experimental.	37
4.	Distribución de la intensidad de luz UV-C en la cámara en W/m ² .	45
5.	Rendimiento másico de fajitas de pollo.	47
6.	Porcentaje de pérdida de peso de fajitas de pollo en refrigeración.	58
7.	Porcentaje de pérdida de peso por cocción de fajitas de pollo.	60
8.	Porcentaje de líquido drenado de fajitas de pollo.	62
9.	Cambios en la actividad de agua de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2°C.	75

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de tratamientos de luz ultravioleta (UV-C) y/o infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanocápsulas de aceite esencial de romero sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas y texturales de fajitas de pollo envasadas a vacío y almacenadas en refrigeración a 2 °C durante 11 días. Se evaluaron los cambios de color, pérdida de peso, líquido drenado, firmeza, capacidad de retención de agua, porcentaje de ácido láctico, pH, conductividad eléctrica y actividad de agua de 9 lotes: 1) Control, 2) Fajitas marinadas, 3) Tratamiento con luz UV-C, 4) Tratamiento con ultrasonido, 5) Tratamiento con UV-C/Ultrasonido, 6) Tratamiento con nanocápsulas (incorporadas en el marinado, sin UV-C, ni ultrasonido), 7) Tratamiento con nanocápsulas/UV-C, 8) Tratamiento nanocápsulas/ultrasonido, 9) Tratamiento nanocápsulas/UV-C/Ultrasonido. Cada uno se marinó con vinagre y sal, excepto el lote control.

Se concluyó que en los lotes Ncs, Ncs/UV, Ncs/US y Ncs/UV/US se detuvo la liberación de líquido de las fajitas durante su almacenamiento, además de que presentaron una resistencia al corte y firmeza similar al estado fresco. La CRA, el pH y la a_w disminuyeron conforme los días de almacenamiento en todos los lotes, aunque aquellos con nanocápsulas presentaron los menores valores de pH y estos se mantuvieron constantes. Se demostró que la irradiación UV-C, el ultrasonido y la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero aumentan la calidad del color de las fajitas de pechuga de pollo almacenadas a 2 °C y son efectivos en la conservación de sus propiedades físicas, fisicoquímicas y texturales.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tendencia de consumo de la carne de pollo ha aumentado considerablemente. Esto se debe a que es un alimento con gran valor nutricional, además de que es económicamente accesible y una alternativa a la carne roja (Kerry et al., 2002; Milicevic et al., 2015). Sin embargo, la pechuga de pollo fresca es una de las más susceptibles a contaminación en la superficie. Razón por la cual, los parámetros de calidad de este alimento se ven afectados y, por consiguiente, la aceptabilidad del consumidor disminuye (Castañeda, 2013).

No obstante, estas variaciones en la calidad de la carne de pollo fresca pueden evitarse mediante tratamientos previos, puesto que es necesario que la industria avícola asegure un estado fresco y saludable al consumidor. Existen tecnologías emergentes que surgieron como una alternativa de conservación y procesamiento de alimentos, las cuales no modifican la matriz del alimento, manteniendo la composición nutricional, así como las propiedades organolépticas y las fisicoquímicas del estado fresco. Algunas de éstas son: la luz ultravioleta (UV-C), la nanotecnología y el ultrasonido.

La irradiación de luz ultravioleta es un método físico de conservación de alimentos, el cual ha demostrado ser una alternativa viable a los tratamientos térmicos, con la finalidad de incrementar la vida de anaquel del producto. Así mismo, la aplicación de la tecnología de luz ultravioleta se ha utilizado como una solución a la esterilización química de productos alimenticios (Chun et al., 2010). Mediante la evaluación de este método, se ha comprobado su eficacia en la inactivación de agentes patógenos en la superficie de alimentos; es por esta razón que ha sido aprobada para su aplicación en los mismos. Actualmente, se ha demostrado que la irradiación de luz UV-C no causa daños en las propiedades sensoriales y la composición del alimento a tratar (Koutchma et al., 2009).

A su vez, la nanotecnología también ha generado gran impacto en la industria alimentaria, ha emergido como un avance tecnológico en el desarrollo y transformación del sector agroalimentario. Por medio de ésta, se ha logrado potencializar la producción de alimentos, aumentar su seguridad y prolongar el tiempo de conservación de productos. Además, se han generado alimentos con propiedades funcionales y de gran valor nutricional, mejorando su calidad y permitiendo la manipulación de sustancias, como la encapsulación de compuestos de interés y el enmascaramiento de sabores (Rubenick et al., 2017).

Los aceites esenciales, como el de romero, son agentes antioxidantes y antimicrobianos que representan un método de conservación natural en alimentos. A pesar de ello, su aplicación resulta complicada debido a la interacción del alimento con los aceites esenciales. La nanotecnología facilita su empleo a través de la encapsulación. Este proceso proporciona efectividad en su estabilización y previene la pérdida de los compuestos volátiles. Las nanocápsulas pueden actuar como una reserva y liberación controlada de sustancias bioactivas. A pesar de ello, la nanotecnología aún es considerada subdesarrollada, especialmente en el ámbito comercial (Granata et al., 2018).

Otra tecnología considerada como emergente en la industria de alimentos es el ultrasonido, el cual tiene un amplio rango de aplicaciones en diversos sectores, en el procesamiento de alimentos es utilizado con la finalidad de acelerar los procesos sin dañar la calidad de los productos (Alarcon-Rojo et al., 2015). El ultrasonido es aplicado para impartir efectos positivos en los alimentos, su mecanismo de acción induce cambios mecánicos, físicos, químicos/bioquímicos a través de la cavitación, actuando como método de procesamiento y conservación.

Se ha demostrado que el ultrasonido aplicado a la carne de pollo incrementa la eficiencia de marinado, potencializa el color y reduce el tiempo de procesamiento; mejorando sus características debido a la infiltración de las sustancias a través de los poros del alimento, gracias a la frecuencia y amplitud de onda aplicada (Awad et al., 2012). El marinado es el proceso en el cuál se incorpora una solución al alimento mediante la inmersión y tiene por finalidad mejorar el sabor y la textura de la carne. Es una tecnología importante en la industria avícola debido al aumento en la demanda de consumo y suministro de alimentos procesados y listos para el consumo (Yusop et al., 2011).

No obstante, el método de conservación más utilizado para la prolongación de la vida útil de los alimentos, específicamente la carne de pollo, es la refrigeración. Ésta se ha practicado durante muchos años y se considera esencial en la industria avícola para garantizar la seguridad de los productos. La pechuga de pollo fresca se almacena a bajas temperaturas de 0 a 4 °C, sin embargo ésta sólo puede mantenerse durante un periodo de 1 a 2 días conservando su frescura. Por esta razón, las tecnologías emergentes en conjunto con la refrigeración son una manera de maximizar la eficiencia de conservación en el alimento y de aumentar su vida útil aportando las condiciones necesarias que permitan mantener la calidad final del producto, es decir sus propiedades físicas y fisicoquímicas durante su almacenamiento.

La calidad de la pechuga de pollo se evalúa con base en atributos como el color, la capacidad de retención de agua y la firmeza; estos dependen de las condiciones de procesamiento y conservación. Además están directamente relacionados con las propiedades fisicoquímicas de la carne de pollo, tales como el pH y la actividad de agua, los cuáles son indicativos de su vida útil (Qiao et al., 2001; Kaewthong y Wattanachant, 2017). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la irradiación de luz ultravioleta y/o la infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanocápsulas de aceite esencial de romero sobre los cambios físicos, fisicoquímicos y texturales de fajitas de pollo.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Carne de pollo

El Codex Alimentarius define la carne como “todas las partes de un animal que han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o que se destinan para este fin” (FAO/OMS, 2005). Según la Norma Mexicana NMX-FF-080-SCFI-2006. *Productos avícolas carne de pollo de engorda en canal y en piezas*, el pollo fresco es aquél sacrificado y sometido a un proceso de conservación mediante frío, a una temperatura de 0 a 4 °C y una humedad relativa de 75 % durante 1 a 3 días posteriores a su sacrificio. Además, se define a la pechuga de pollo, como aquella que conforma los músculos pectorales, los cuales forman las masas carnosas que se alojan en el esternón y que constituyen la parte de más valor en el pollo. Cabe mencionar que ésta es la porción más demandada y de mayor valor económico en algunos mercados.

La carne de pollo proviene del llamado pollo de engorda. Por medio de la selección genética, en la industria avícola mundial de la actualidad, se han logrado obtener estas aves de rápido crecimiento. Mediante la evaluación del desarrollo de la musculatura de cada ave, se ha registrado información en plantas de procesamiento para seleccionar con base en la calidad de la composición corporal. De esta manera, el pollo de engorda nace pesando alrededor de 46 g y transcurridas las 7 semanas alcanza un peso de alrededor de 2.800 kg debido a una dieta balanceada acorde a sus necesidades y a su potencial genético, además de su manejo adecuado, bioseguridad y la medicina preventiva. Este tipo de aves pesadas son híbridas producto de la cruce de una línea macho y una línea hembra, que a diferencia de sus progenitores y de las aves de estirpes ligeras productoras de huevo, desarrollan un pectoral más voluminoso, patas más gruesas, postura diferente y un mayor apetito (Casaubon, 2017).

Las carnes y aves están compuestas, en forma natural, de agua, músculo, tejido conectivo, grasas y huesos. El músculo es aproximadamente un 75 % agua (aunque diferentes cortes podrían contener mayor o menor cantidad de agua) y un 20 % proteína, con un restante de 5 % de una combinación de grasa, carbohidratos y minerales. El por ciento de agua que ocurre en forma natural en la carne varía con el tipo de músculo, el tipo de carne, la época del año y el pH de la carne. La grasa en las carnes se encuentra entre los músculos y también dentro de éstos. En ambos lugares, la grasa contribuye al sabor completo y a la jugosidad de las carnes (USDA, 2007). En la Tabla 1 se presenta la composición nutricional de la pechuga de pollo, y cabe resaltar que el contenido de agua y de proteína son los que predominan en esta carne.

Tabla 1. *Composición media proximal por cada 100 g de carne de pechuga de pollo (USDA, 2018).*

	Sin piel	Con piel
Energía (kcal)	120	172
Humedad (g)	73.90	69.5
Proteína (g)	22.50	20.8
Lípidos (g)	2.62	9.2
Ácidos grasos monoinsaturados	0.689	3.820
Ácidos grasos saturados	0.563	2.660
Ácidos grasos poliinsaturados	0.424	1.960
Ácidos grasos trans	0.007	0.105
Minerales (g)	1.1	1.0
Zinc	0.68	0.80
Hierro	0.37	0.74
Potasio	0.334	0.220
Fósforo	0.213	0.174
Sodio	0.045	0.063
Magnesio	0.028	0.025
Calcio	0.005	0.011

La carne proveniente del pollo se considera un alimento de alto consumo mundial. Los mayores productores son Estados Unidos con el 20%, China 16.6%, Brasil 15.1% y la Unión Europea con el 11.3%. La pechuga de pollo es un alimento de gran calidad nutricional debido a su bajo contenido en grasa, una concentración relativamente alta de ácidos grasos poliinsaturados, además de su excelente calidad de proteína y contenido de aminoácidos esenciales (Gertzou et al., 2017).

El consumo mundial de carne de pollo aumentó en comparación con la carne roja durante el año 2016, especialmente la pechuga de pollo sin hueso, sin piel y marinada, entre otros productos avícolas; impulsada por el reconocimiento por parte de los consumidores como fuente de proteína animal confiable y asequible. Respecto al panorama nacional, la producción de pollo en México ha mantenido una tendencia creciente principalmente en entidades como Veracruz, Aguascalientes, Querétaro y Jalisco (Figura 1).

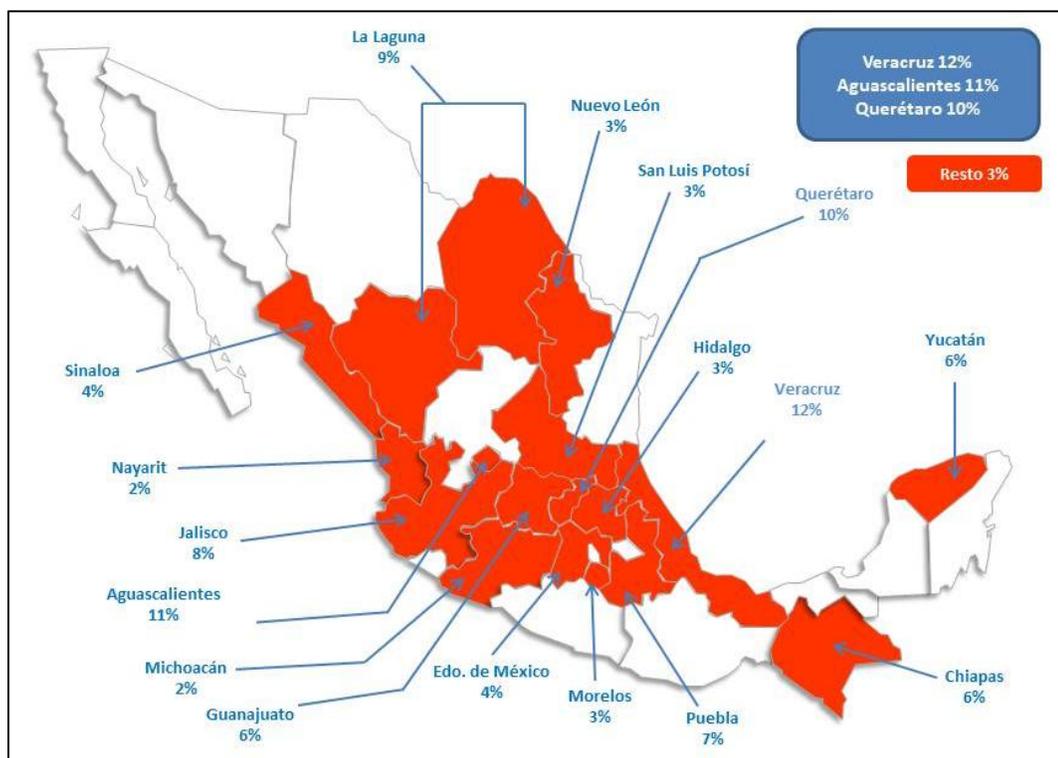


Figura 1. Estados productores de pollo en México (Unión Nacional de Avicultores, 2014).

El consumo nacional aparente de carne de pollo en México entre 2006 y 2015 creció a una tasa media anual de 2.7 por ciento. Así mismo, el consumo per cápita de este alimento en México ha aumentado a una tasa media anual de 1.5 por ciento. Mientras que el consumo per cápita de la carne de cerdo muestra un comportamiento similar a la carne de ave; el consumo de carne de res, en el mismo periodo, ha presentado una disminución gradual (Avicultura, 2016).

Los principales factores que influyen en la adquisición de la carne de ave son el precio y la calidad. La calidad, incluido el sabor, la frescura y la ternura de la carne, ha sido el principal aspecto de satisfacción del consumidor. Se prevé que el consumo de la carne de ave continúe aumentando en mayor proporción, mientras que la carne de porcino se mantenga sin cambios. No obstante, la carne de vacuno, y en particular la carne de ovino, se proyectan que continúen en consumo decreciente (Zhuang et al., 2007).

1.1.1. Parámetros de calidad de carne de pollo fresca

Los consumidores en todos los mercados demandan alimentos agradables, seguros y saludables, es decir productos que sean de alta calidad. Es esencial que la industria avícola considere los atributos o parámetros de calidad más importantes que se necesitan para mantener y mejorar los productos. Estos parámetros son complejos de analizar, debido a que dependen de diversos factores que pueden ser extrínsecos e intrínsecos. El establecimiento de parámetros relevantes y efectivos ofrece una ventaja en el mercado, puesto que los atributos no son del mismo valor para todos los consumidores, pero son necesarios para su evaluación.

La calidad de la carne de pollo es la suma de las características del producto alimenticio y la aceptabilidad o preferencia por el consumidor. En este alimento se evalúan diversos aspectos que definen la calidad del mismo, normalmente es evaluado con base en el color, la ternura o firmeza y la jugosidad. Los cuales, además, están directamente relacionados con las propiedades fisicoquímicas de la carne de pollo, tales como el pH y la actividad de agua, dando como consecuencia el nivel de satisfacción del consumidor que se asocia con la seguridad, salud y la frescura del alimento (Milicevic et al., 2015).

La carne de ave se evalúa desde diferentes puntos; desde una perspectiva del consumidor y mercadeo, clasificación adecuada de la canal, buena apariencia, parámetros nutricionales, fisicoquímicos y sensoriales. Según la Norma Mexicana NMX-FF-080-SCFI-2006 *Productos avícolas carne de pollo de engorda en canal y en piezas*, la pechuga de pollo debe estar totalmente cubierta por la piel y no presentará daño o lesión evidente a la inspección. La unión de la pechuga con la espalda debe ser ancha y las masas musculares deben cubrir totalmente el esternón, tanto en la parte superior, como en la inferior en los límites con el abdomen. Las zonas cartilagosas son visibles a través de la piel que recubre la pechuga, y estarán prácticamente cubiertas por los músculos pectorales.

El tamaño está íntimamente ligado al peso del animal, la pechuga de pollo representa alrededor del 40% del peso total del ave; así mismo, guarda una proporción adecuada respecto a la talla, ya que una pechuga larga, ancha y redondeada es característica de un pollo fuerte, de buen peso y de buen tamaño. Milicevic et al. (2015) describen que la pechuga de pollo no debe tener lesiones, tal y como se muestra en la Figura 2, y consideran que las masas musculares que llegan a estar expuestas son el resultado de heridas, rasgaduras, falta de piel, fracturas y dislocaciones, y por lo tanto disminuyen su calidad.



Figura 2. Pechuga de pollo fresca (Informe Pastrán, 2017).

El color es una característica sensorial importante en los alimentos, generalmente indica el grado de calidad y la frescura de un producto alimenticio. De hecho, es uno de los factores principales en los que se basa la preferencia del consumidor.

La NMX-FF-080-SCFI-2006 manifiesta que, la carne de pollo consumida en México se admite en dos colores, el blanco y el amarillo. Este parámetro puede ser determinado cuantitativamente en métodos específicos como en la escala Hunter y la escala de color CIELAB, los cuales usan medidas del croma. El croma se define como la saturación del color, describe lo llamativo o apagado de un color, se relaciona con el matiz y define la percepción del color de un objeto.

Los parámetros del color son asignados como L , a y b en la escala de Hunter y el L^* , a^* y b^* en la escala de color CIELAB. En ambas escalas, L indica la luminosidad, la cual se refiere a la intensidad lumínica o grado de claridad, mientras que a y b indican la cromaticidad. Los valores de $-a$, $+a$, $-b$ y $+b$ determinan la tendencia a los colores verde, rojo, azul y amarillo. Su evaluación es relevante en la calidad de la carne de pollo, ya que son útiles para la determinación de algunos cambios en el alimento debidos a las reacciones químicas y enzimáticas que ocurren en el mismo durante su conservación y almacenamiento. Las pechugas de pollo en estado crudo y fresco, para la USDA (2008), tienen un color que puede variar de blanco azulado a amarillo, todos estos colores son normales y están directamente relacionados con la especie, edad y/o dieta.

Las aves más jóvenes tienen menos grasa debajo de la piel, lo cual puede generar en la carne un color azul, adicionalmente, una piel amarilla puede ser resultado de pigmentos incorporados en la alimentación. Sin embargo, en cada caso, el color debe ser uniforme y sus deficiencias por decoloraciones localizadas o difundidas, serán motivo de su clasificación en distintas categorías (USDA, 2008). Diversos investigadores han evaluado los parámetros de color en pechuga de pollo para analizar el efecto de su procesamiento, es decir, de los tratamientos a los que es sometido el alimento y de las condiciones de su almacenamiento sobre la calidad sensorial de las muestras (Meltem, 2009).

En la Tabla 2 se presentan algunos de los parámetros de calidad que se consideran en la carne de pollo para su clasificación y aceptabilidad. El color de la carne se considera aceptable cuando ésta presenta un color rojo/rosado y no aceptable si se tienen manchas y tendencia al color verde y marrón. Por su parte, la grasa debe presentarse de coloración blanca, no amarilla.

Se considera también a la textura de la carne de pollo como otro factor importante en la calidad de la misma, específicamente la terneza o firmeza de la carne de pollo, sobre todo en la pechuga, la cual depende básicamente de su grado de maduración; que, a su vez, es dependiente del tiempo transcurrido entre el momento del sacrificio hasta el momento de su despiece. Existen diversos factores que afectan la calidad de la carne; mientras el pollo sea de menor edad, se tendrá menor cantidad de carne y madurez del colágeno, por otro lado, la carne será más jugosa cuando se tenga un mayor contenido de humedad y grasa. Además, para obtener una carne de color claro se requiere un menor contenido de pigmentos.

Tabla 2. *Parámetros de calidad de la carne de pollo* (Gómez y Gómez, 2013).

	Aceptable	No aceptable
Apariencia		
Color de la carne	Rojo/rosado	Marrón, gris, verde
Grasa de la carne	Blanco	Amarillo
Textura	Firme	Suave, blanda y seca
Goteo	Ninguno	Cualquier exudado
Palatabilidad		
Textura	Suave	Blanda, dura
Sabor	Característico	Rancio
Jugosidad	Apreciable	Sabor ácido

En términos de jugosidad de la carne, se debe evaluar la calidad del músculo, es decir, la fisiología del músculo de la pechuga y la eliminación de todo tipo de defectos de los filetes. Además de la composición química de la carne, junto con la terneza y textura. La dureza o firmeza de la pechuga de pollo es uno de los atributos sensoriales más importantes de su calidad y que determina la aceptación del consumidor. Los principales componentes de la carne que contribuyen a su terneza son el tejido conectivo, las fibras musculares y los lípidos asociados al tejido muscular, aunque estos últimos son los de menor importancia en este aspecto.

La firmeza de la carne de pollo puede ser medida empleando métodos estandarizados, con equipos como el texturómetro, equipado con sondas como la Warner-Braztler. El método Warner-Braztler consiste en medir la máxima resistencia al “corte” de una pieza de carne de pollo en estado fresco o después de su cocimiento. Diversos estudios han demostrado que los filetes de pechuga despostados antes de la finalización del rigor mortis muestran una mayor dureza. Seabra et al. (2001) determinaron que la carne de pollo madurada durante 24 h produce menores valores de corte que aquellas deshuesadas sin madurar. Así mismo Thielke et al. (2005), indicaron que el deshuesado y congelado pueden conducir a una mayor dureza de la carne si el *rigor mortis* no se ha completado. El estado contráctil de las proteínas miofibrilares está relacionado principalmente con el desarrollo este proceso.

La firmeza de la carne de pollo se relaciona a las propiedades fisicoquímicas de la misma, éstas dependen principalmente del proceso *post mortem*, el cual se desarrolla a través de una variedad de procesos bioquímicos. Las características físicas, fisicoquímicas y texturales de la carne final son una resultante de la evolución de la temperatura, aumento del ácido láctico y disminución del pH en el periodo *post mortem*. El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno; el pH del músculo vivo está entre el 6. No obstante, cuando se produce la muerte del animal, el aporte de oxígeno a los tejidos se detiene, y predominan los procesos anaeróbicos generando la formación de ácido láctico a partir del glucógeno muscular provocando el descenso del pH en el músculo, de modo que dicho valor es índice las modificaciones bioquímicas *post mortem* (Gómez y Gómez, 2013).

El proceso en el que se desciende el pH muscular de la carne de pollo, a consecuencia de la acumulación de ácido láctico, es uno de los cambios más significativos que ocurren en el músculo durante su conversión en carne. La velocidad de descenso del pH y el punto final alcanzado son relevantes en términos de calidad y desarrollo del color (Kaewthong y Wattanachant, 2017). Así mismo, la firmeza y la capacidad de retención de agua son atributos físicos que también están influenciados por la temperatura y el descenso del pH. Según Barbut (2009), un patrón normal de reducción del pH está representado por una disminución gradual hasta alcanzar aproximadamente un pH de 5.8. El valor del pH y la cantidad de ácido láctico acumulado dependen de la cantidad de glucógeno presente en el tejido en el momento de la muerte.

Por otro lado, Gómez y Gómez (2013) describen que, una vez completado el proceso de maduración de la carne de pollo, ésta debe de tener un pH comprendido entre 5.4 y 5.6, pues estos valores permiten la inhibición del crecimiento de algunos microorganismos, además de que le proporciona al alimento las características fisicoquímicas adecuadas. De igual manera, la actividad de agua tiene gran influencia en la estabilidad microbiológica, es un parámetro de calidad relacionado con las propiedades fisicoquímicas del alimento. Además de que es determinante en la capacidad de retención de agua de la pechuga de pollo y la firmeza que ésta llega a tener.

1.1.2. Deterioro de la carne de pollo

La carne de pollo es una de las fuentes principales de bacterias como *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y *Salmonella spp.*, las cuales están presentes en la micro flora intestinal del pollo. Así mismo, este alimento se puede contaminar cuando se tiene un mal manejo de la materia prima y, una vez contaminado, aumenta el riesgo de causar alguna enfermedad al consumidor cuando no se tiene una temperatura y tiempo de cocción adecuados. Por esta razón, el procesamiento del pollo debe ser considerado importante cuando se pretende la disminución de enfermedades transmitidas por alimentos. No obstante, aunque el pollo sea sanitizado en agua helada antes de su empaque, la contaminación cruzada es inevitable, teniendo en cuenta que éste es un alimento propenso al desarrollo de microorganismos debido a su composición proteica, pH y actividad acuosa. Una vez que se contamina, la disminución de su calidad y de su vida útil es inevitable (Chun et al., 2010).

Cabe resaltar que el deterioro de la carne de pollo es fundamentalmente de origen bacteriano, y los compuestos volátiles producidos por éstas, son los responsables de los malos olores detectados en la alteración de las canales de pollo frescas. Generalmente, la principal causa de contaminación de los productos avícolas procesados ocurre durante el deshuesado, la remoción de la piel y el cortado de la carne. Por esta razón, las bacterias que se encuentran en la piel y la cavidad de la carcasa del pollo resultan un riesgo en la carne de pollo fresca (Chun et al., 2010).

Algunos indicadores de deterioro en la pechuga de pollo son el color oscuro, manchas en la piel y la pérdida de firmeza. Los efectos en los parámetros fisicoquímicos incluyen la disminución en el pH y como consecuencia aumento de la acidez, pérdida de agua y, a su vez, disminución de la conductividad eléctrica. La pechuga de pollo cuyo pH es de 5.7 a 5.9 se deteriora más lentamente que aquella con pH de 6.3 a 6.6.

1.1.3. Marinado de pechuga de pollo

El marinado es el proceso en el cuál se incorpora una solución líquida a la carne, con la finalidad de mejorar la textura y potencializar el sabor. Un marinado puede contener sal, azúcar, ácidos orgánicos, agua, especias, vinagre, emulsiones de aceite-agua, aditivos funcionales (goma xantana, goma guar), agentes antimicrobianos y potenciadores de aroma (Yusop et al., 2011). El marinado es comúnmente utilizado en la industria avícola para aumentar la blandura, jugosidad y mejorar la carne en estado fresco. Los ingredientes incorporados a la carne de pollo en el proceso de marinado sirven, además, para extender la vida útil del producto y mejorar su sabor (Zhuang et al., 2007).

Las soluciones de marinado, principalmente las que contienen sal, se han estudiado debido a su funcionalidad en la pechuga de pollo, pues gracias a éstas se ha mejorado la capacidad de retención de agua del alimento, la cuál involucra el peso ganado, el líquido drenado, las pérdidas por cocción y el rendimiento total del producto. Adicionalmente, el proceso de marinado es una técnica importante que mejora los parámetros de calidad sensoriales durante el almacenamiento y el aprovechamiento másico del producto final, aumentando el rendimiento de cocción de la pechuga de pollo (Kaewthong y Wattanachant, 2017).

Los consumidores, generalmente incorporan los marinados a la carne a través de la inmersión. Este método consiste en sumergir la carne en el líquido permitiendo la penetración del mismo en el alimento a través de la difusión durante cierto tiempo. La incorporación de sustancias como ácidos orgánicos (acético, láctico y cítrico) reducen el pH y son empleados como parte de los potencializadores de sabor, con la finalidad de brindar un efecto conservador al alimento (Yusop et al., 2011).

La pechuga de pollo marinada es uno de los productos más aceptados por el consumidor debido que el sabor del alimento se intensifica y se complementa, por esta razón el marinado ha sido reconocido para mejorar la calidad y la versatilidad de las carnes. Sin embargo, se ha reportado que las sustancias ácidas tienen un mayor efecto en el ablandamiento y el sabor de la carne tratada, causando el hinchamiento de las fibras de la carne. Los marinados ácidos en la carne de pollo involucran diversos factores funcionales, incluyendo el debilitamiento de las estructuras debido al hinchamiento de la carne, incrementando la proteólisis y la conversión del colágeno a gelatina en bajos pH durante la cocción.

El ácido del marinado causa la degradación de los tejidos de carne de aves, ablandando el alimento y aumentando su absorción de líquido, haciéndola más jugosa. A su vez, permite que la vida útil de la pechuga de pollo aumente, ya que los aditivos de los productos marinados de pollo tienen cierta influencia en la inhibición del crecimiento bacteriano, aunque su principal función es la mejora en sus características organolépticas (Smaoui et al., 2012).

1.1.4. Métodos de conservación de pechuga de pollo fresca

La mayor preocupación de la industria de alimentos es extender la vida útil del producto, asegurando a los consumidores la seguridad de éstos (Gertzou et al., 2017). Durante el procesamiento del pollo se realizan algunas técnicas, las cuales son necesarias para la obtención de la carne, y que además son relevantes en la conservación del alimento. Después de realizar el desplumado y la evisceración, se realiza un enfriamiento de la carne.

Primero se realiza un preenfriamiento por inmersión, el cual consiste en la disminución rápida de la temperatura corporal; en éste se deben utilizar temperaturas de agua de alrededor a 26 °C, con la finalidad de favorecer la ganancia de peso y la hidratación final, además de prevenir el crecimiento bacteriano. El lavado de la carne de pollo con agua potable es un método utilizado extensamente en la industria de procesamiento avícola debido a la reducción de cuentas microbianas en un 90 a 99 % (Rodríguez, 2011).

En la siguiente etapa de enfriamiento por inmersión, Rodríguez (2011) especifica que el agua o la mezcla de hielo y agua debe estar en promedio a 0 °C, para que después de unos 45 a 60 minutos, las canales salgan del enfriador con una temperatura corporal de 2 °C, medida en la parte superior de la pechuga, y con un mayor volumen de carne. Este proceso es relevante para las características finales del producto, como su capacidad de retención de agua, el rendimiento másico y el líquido drenado que presente durante el tiempo de almacenamiento en refrigeración. En el cual, la carne de pollo debe estar a la temperatura ya mencionada para evitar la pérdida de peso. Otros métodos incluyen el enfriamiento por aire seco soplando aire frío sobre los pollos procesados; y el enfriamiento evaporativo, el cual utiliza una combinación del aire frío y la vaporización de agua.

Después del enfriamiento y una vez que se obtiene la carne de pollo, se coloca en cajas y se almacena en cámaras de conservación de producto a temperatura de refrigeración. Con la finalidad de la eliminación de los patógenos en la superficie de la carne de ave, diversos investigadores en la industria han trabajado en tratamientos por aire y líquidos criogénicos, como el nitrógeno. Existen también otros métodos de conservación no térmicos para la descontaminación y conservación de la pechuga de pollo, incluyendo el envasado a vacío y en atmósferas modificadas, productos químicos, pulsos eléctricos de alta intensidad, procesamiento en altas presiones, energía ultrasónica, irradiación de luz ultravioleta, y luz ultravioleta pulsada (Meltem, 2009).

1.1.5. Almacenamiento en refrigeración de pechuga de pollo

El empleo de bajas temperaturas alarga la vida útil de los alimentos frescos o procesados. En la producción de pechuga de pollo fresca, una vez que se realizan las etapas de enfriamiento de la carne, se emplea la refrigeración por aire a través de procesos mecánicos en las cámaras de conservación de producto. La refrigeración consiste en mantener la temperatura de la carne de pollo por encima de su punto de congelación desde el momento del sacrificio hasta la conservación, el almacenamiento de este alimento se realiza a temperaturas entre 0 a 4 °C. El objetivo de este método es la reducción del crecimiento de microorganismos y de las reacciones enzimáticas, además del alargamiento la vida útil del producto.

El método de conservación a bajas temperaturas en condiciones óptimas permite reducir las pérdidas cualitativas y cuantitativas de la pechuga de pollo para mantenerla en buen estado de calidad para su consumo en estado fresco. No obstante, la refrigeración aplicada a la carne de pollo puede generar cambios físicos, químicos y texturales, los cuales están relacionados con la temperatura, la humedad de la cámara y el tiempo de almacenamiento. Por consiguiente, al controlar estos parámetros se puede conservar de manera óptima en un estado de calidad aceptable. Como ya se mencionó, es necesario realizar la etapa de enfriamiento lo más rápido posible después de la matanza del pollo y conservarse a una temperatura estable durante su almacenamiento (Lázaro et al., 2014).

Debe considerarse que la actividad de agua de la pechuga de pollo es alrededor de 0.9 (equivalente al equilibrio con ambiente del 90 % de humedad relativa). Sin embargo, en la cámara de refrigeración se pueden generar pérdidas de peso por transferencia de agua hacia el ambiente a humedades inferiores, disminuyendo el rendimiento másico de la carne. Cuanto mayor sea la humedad relativa ambiental, menor serán las pérdidas en el producto. Aunque, una humedad muy alta puede generar condensación superficial en el alimento, favoreciendo el crecimiento de microorganismos.

La refrigeración es importante en la conservación de la carne de pollo porque detiene el crecimiento bacteriano. Las bacterias se encuentran en el suelo, aire, agua y en los alimentos. Cuando estos tienen nutrientes, humedad y temperatura favorable, crecen y aumentan en número hasta el punto en el que pueden causar enfermedades. Las bacterias crecen rápidamente en un rango de temperatura entre 4.4 °C a 60 °C (40 a 140 °F). Es por ello que un refrigerador acondicionado a 4.4 °C (40 °F) o menos puede proteger la mayoría de los alimentos. Para inocuidad alimentaria es importante verificar la temperatura de la cámara de conservación. En realidad, la principal desventaja es que la carne de pollo puede mantenerse en refrigeración durante un periodo de 1 o 2 días conservando su frescura. Sin embargo, después de ese tiempo, los microorganismos psicrófilos causan el deterioro del alimento aún en bajas temperaturas (USDA, 2015).

1.2. Tecnologías emergentes en la conservación de alimentos

Las tecnologías emergentes en la industria de alimentos surgieron como una alternativa de procesamiento y alargamiento de la vida útil de los productos, las cuales se destacan por no afectar las características sensoriales ni la calidad nutricional de los mismos. Además es importante resaltar que utilizan menos energía en el proceso. Algunas de las tecnologías emergentes son: altas presiones, pulsos eléctricos, luz ultravioleta, irradiación, ultrasonido, nanotecnología. Estos son métodos sustentables que han impactado en el mercado debido a que ofrecen productos con parámetros de calidad físicos y fisicoquímicos similares al estado fresco, además de que no contaminan el medio ambiente y logran mantener las propiedades sensoriales y nutritivas del alimento, promoviendo su conservación y accesibilidad al consumidor por periodos más largos.

Actualmente, los mercados buscan alimentos naturales y aquellos que sean mínimamente procesados. Por consiguiente, la industria de alimentos ha generado productos que mantengan sus propiedades iniciales con ayuda de las tecnologías emergentes (Granata et al., 2018). La eficacia de estos tratamientos depende de las condiciones en las que se aplique al alimento y del cuidado higiénico que se tenga durante el procesamiento. Específicamente, la industria avícola ha tenido que hacer uso de estas tecnologías innovadoras y emergentes con la finalidad de satisfacer al consumidor ofreciendo productos frescos y seguros. Esto se debe a que es común que se lleve a cabo la proliferación de microorganismos en productos avícolas durante su almacenamiento a temperaturas de refrigeración (Olivera y Cárdenas, 2013).

Como ya se mencionó, las tecnologías emergentes se distinguen de la mayoría de los procesos convencionales porque mantienen la mayoría de los parámetros de calidad iniciales del producto final, además no involucran tratamientos térmicos o aditivos que generen cambios en la matriz cárnica. Los métodos de conservación de la pechuga de pollo tienen el objetivo de alargar su vida útil, conservando sus características organolépticas e inhibiendo el crecimiento microbiano para garantizar su inocuidad (Castañeda, 2013). La utilización de las tecnologías no térmicas proporciona una ampliación de la oferta, las características del producto fresco y el incremento de vida de anaquel. Su efectividad se ha estudiado y se ha determinado su correcta forma de aplicación en diversos alimentos.

1.2.1. Irradiación de luz ultravioleta (UV-A, UV-B y UV-C)

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética en la región espectral, la cual tiene propiedades germicidas, debido a que desactiva el ADN de bacterias, virus y otros patógenos (Meltem, 2009). La radiación ultravioleta se ha dividido en tres regiones dependiendo de su longitud de onda. La UV-A es aquella con longitud de onda larga de 315 a 400 nm, la UV-B de 280 a 315 nm, y la UV-C tiene una longitud de onda corta ubicada en los 200 y 280 nm. Esta última es la que se considera como el rango germicida, con una longitud de onda óptima de 254 nm, con propósitos de desinfección de superficies y alimentos. Sin embargo, la radiación de luz ultravioleta de longitud de onda corta (UV-C) no atraviesa la capa de ozono, por lo que fue hasta que se creó la tecnología de radiación artificial que se pudo utilizar en la industria (Chun et al., 2010).

Se han creado fuentes de radiación artificiales con fines prácticos de desinfección. Éstas son fabricadas utilizando lámparas de mercurio de baja presión, que producen radiación con la longitud de onda mencionada (UV-C) de 254 nm. La luz ultravioleta germicida (UV-C) es un poderoso agente bactericida en la industria alimentaria, no es ionizable y al ser absorbida por las proteínas y los ácidos nucleicos afecta al material genético de los microorganismos, induciendo cambios en la multiplicación y viabilidad celular (Haughtony et al., 2011).

La radiación de luz ultravioleta en alimentos tiene numerosas ventajas en comparación a otros métodos de sanitización existentes. No requiere de productos químicos ni de la aplicación de calor, además de que es de precio accesible. Actualmente, la tecnología de radiación UV-C es utilizada como una alternativa a la esterilización química, y es importante mencionar que ha sido aprobada por la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA: Food and Drug Administration) con la finalidad de eliminar la carga microbiana inicial y aumentar la seguridad alimentaria (Chun et al., 2010). Según estudios realizados por Dong et al. (2013), es el tratamiento más eficaz en la eliminación de agentes patógenos de la carne roja y la de ave.

1.2.1.1. Tratamiento con luz UV-C

El mecanismo de acción que genera la irradiación de luz UV-C en la superficie de los alimentos es el daño que ésta causa en el ADN de los microorganismos, formando uniones cruzadas de tiamina y citosina. No obstante, en este tratamiento es posible que se generen sustancias iniciadoras de la oxidación del alimento, por lo existe el riesgo de que las características organolépticas del producto se modifiquen, específicamente el color de éste, pero es importante resaltar que esto depende completamente de la dosis empleada y la forma de aplicación de la luz ultravioleta. Por ello se comenzó a investigar la irradiación de luz UV-C en forma pulsada, es decir, aplicando sobre el producto flashes o pulsos de luz intensa, de manera que la liberación de ésta en la superficie del producto sea de forma rápida. El escaso tiempo de exposición limita la formación de estos componentes, lo que inhibe los cambios indeseables (Tortora et al. 2007).

Los pulsos de luz ultravioleta son igual de eficaces que el tratamiento con luz fija. Éstos son creados a través de la compresión de energía eléctrica en pulsos cortos y mediante la utilización de éstos se energiza la lámpara de xenón. La lámpara emite luz por unos cuantos microsegundos. Con la dosis y las condiciones de proceso adecuadas, se puede eliminar significativamente el riesgo de contaminación en los alimentos debido a una reducción de la carga microbiana existente. Por consiguiente, la irradiación de luz UV-C de forma pulsada se considera como una mejor alternativa a la descontaminación de productos mínimamente procesados, debido a que es un tratamiento en el cuál no se necesitan químicos ni aplicaciones térmicas. La eficacia de este método en pechuga de pollo fresca y otros productos alimenticios se evaluó por Meltem (2009).

Cabe resaltar que el mecanismo de la luz de UV-C pulsada consiste en la exposición de cierto número de pulsos al producto, este es el único requerimiento para su aplicación. Esta tecnología se utiliza como esterilización en diversos procesos; y para procesamientos continuos en la industria, el alimento puede ser irradiado fácilmente a través de una banda transportadora con la velocidad necesaria para proporcionar el tiempo suficiente de exposición al producto con el número de pulsos determinados. La inactivación de enzimas y patógenos en la superficie de los alimentos ocurre en periodos cortos de tiempo.

1.2.1.2. Efecto de la irradiación UV-C en alimentos

La acción bactericida de la radiación ultravioleta se basa principalmente en el daño al ADN de las células, y éste es dependiente de la dosis; causando un deterioro oxidativo a las membranas celulares lo cual interfiere con el metabolismo normal para la generación de energía, y por consiguiente, inhibe el crecimiento celular e induce a la muerte. Sin embargo, su uso es limitado debido a la aceptación de los consumidores acerca de los productos irradiados (Chun et al., 2010). Las propiedades germicidas de irradiación UV-C sobre los microorganismos se deben al entrecruzamiento entre las bases de pirimidina en la misma cadena de ADN. De esta manera, la formación de enlaces de hidrógeno a las bases de purina en la cadena opuesta se daña debido a la mutación, bloqueando así la transcripción del ADN y su replicación. Eventualmente se conduce a la muerte celular.

Según Meltem (2009), diversos estudios han demostrado la efectividad de la irradiación de luz UV-C de manera constante o pulsada en alimentos reduciendo la carga microbiana y alargando su vida útil. Es posible tratar con luz UV-C en la superficie distintos tipos de carne (pescado, pollo, carne bovina) antes de su refrigeración en dos o tres ciclos logarítmicos (dependiendo de la dosis aplicada), lo cual puede aumentar en varios días su vida útil. A fin de que la seguridad de los productos avícolas incremente; específicamente en la pechuga de pollo se ha estudiado la irradiación UV-C en su superficie, y se ha determinado que el efecto antimicrobiano se debe a los cambios en la célula. Afecta el ADN, causando mutaciones, mediante la separación de la doble hélice, y evitando su reproducción.

Chun et al. (2010) en su investigación de esta tecnología, obtuvieron como resultados que la irradiación UV-C claramente disminuyó las poblaciones de patógenos inoculados previamente en pechugas de pollo demostrando su efectividad en la inactivación de ciertos microorganismos y en la calidad del alimento durante su almacenamiento. De acuerdo con Dong et al. (2013), las principales ventajas de la irradiación ultravioleta de la carne de pollo son la conservación de la integridad del producto, destrucción de microorganismos patógenos, el aumento de la vida útil, y el mantenimiento de la calidad nutricional. No obstante, las desventajas que se consideran de la irradiación UV-C es la producción de un aroma característico en el producto, cambios oxidativos de los lípidos y la alteración del color en la superficie de la carne.

Por otro lado, en los estudios realizados por Chun et al. (2010) se encontró que en la escala de color Hunter, los valores de L, a y b en los productos irradiados no tuvieron cambios significativos en el estudio. La evaluación de estas propiedades resultó que los productos irradiados aumentan la seguridad microbiana de las pechugas de pollo durante su almacenamiento, sin modificar sus parámetros de calidad sensoriales y fisicoquímicos. El pH de la pechuga control incrementó más a comparación que las muestras irradiadas a distintas dosis, es decir las muestras irradiadas mantuvieron un pH constante.

A comparación con otros métodos de desinfección de pechugas de pollo, la irradiación de luz UV-C no genera cambios en la textura y en los componentes nutricionales del pollo, incluso se abstiene de los tratamientos que utilizan sustancias químicas, las cuales pueden permanecer en la superficie de la carne causando problemas al consumidor. Y cabe resaltar que este método prolonga la vida útil y mejora la seguridad microbiana de la carne de pechuga de pollo durante su almacenamiento. La irradiación UV-C de carne de pollo es un tratamiento menos costoso que se puede establecer fácilmente en una planta procesadora avícola (Chun et al., 2010). Cabe mencionar que Dong et al. (2013), determinaron que el pH, la temperatura y la composición química del alimento tienen un impacto en la supervivencia de los microorganismos durante la irradiación ultravioleta.

1.2.2. Procesamiento ultrasónico

Productos alimenticios, como frutas, verduras, grasas, aceites, azúcar, lácteos, carnes, café, harinas, vitaminas, azúcares, proteínas, fibras, antioxidantes, entre otros compuestos orgánicos y minerales, deben ser procesados y conservados antes de comercializarse. Para ello, se llevan a cabo procesos como freído, filtrado, secado, esterilización, marinado, entre otros. No obstante, estos métodos convencionales de procesamiento de alimentos, consumen tiempo y energía, debido a los calentamientos prolongados, agitación y uso de grandes volúmenes de agua, generando una baja eficiencia de producción. Además de que algunos de los alimentos, ingredientes y productos son termo sensibles y, por consiguiente, pueden sufrir cambios químicos, físicos y texturales, generando pérdidas de compuestos nutricionales y cambios sensoriales (Chemat et al., 2011).

Estas carencias han llevado al uso de nuevos tratamientos, como el ultrasonido, el cual es considerado una tecnología verde y emergente, pues funciona como técnica de procesamiento, pasteurización y extracción, y que por lo general, implica menor tiempo y energía. Se define al ultrasonido como una forma de energía que viaja en ondas de sonido iguales o mayores a 20000 vibraciones por segundo.

Mason (1998) establece al ultrasonido como cualquier sonido con frecuencia más allá de lo que el oído humano puede percibir 16 Hz. Como ya se mencionó, el ultrasonido de potencia representa una tecnología emergente, la cual se ha aplicado en alimentos debido a sus efectos positivos en áreas de procesamiento y conservación. A pesar de que se ha reconocido como una tecnología secundaria en la modificación de procesos o mejora de los mismos, es una técnica que aún no se ha considerado para su uso productos comerciales (Knorr et al., 2004).

No obstante, el ultrasonido tiene un rango muy amplio de aplicaciones en diversos sectores agroindustriales. En la industria es utilizado debido a su potencial de acelerar los procesos sin alterar la calidad de los alimentos, además es otro método viable para la inactivación de microorganismos. Es efectivo en la mejora de algunos parámetros de calidad y en propiedades como textura, retención de agua, color, marinado, rendimiento en la cocción, refrigeración e inhibición microbiana (Meltem, 2009). Alarcon-Rojo et al. (2015) mencionan que el ultrasonido es una herramienta importante en la industria avícola debido a que ayuda a mejorar la blandura de la carne, acelera la maduración y la transferencia de masa, además de que reduce la energía utilizada para la cocción e incrementa la vida útil de la pechuga de pollo sin modificar sus propiedades sensoriales y fisicoquímicas.

El uso de esta tecnología genera efectos significativos en la industria de alimentos. Permite el procesamiento de alimentos en minutos, e incluso segundos, con alta reproducibilidad, reducción de costos en el proceso, simplifica la manipulación, da mayor pureza al producto final, además de que consume sólo una fracción del tiempo y energía utilizada en los procesos convencionales, como la congelación, secado, marinado, blanqueo, esterilización y la extracción, los cuáles se han mejorado al aplicar el ultrasonido de manera eficiente.

Las ventajas de utilizar el ultrasonido incluyen: una mezcla más efectiva y micro-mezcla, mayor transferencia de energía y masa, reducción de gradientes térmicos y de concentración, reducción de temperatura y del tiempo de procesamiento, rendimiento, extracción selectiva, tamaño reducido del equipo, control del proceso de extracción, mayor producción y eliminación de ciertos pasos en el proceso, ahorro de energía, aumento de la vida útil y la calidad de los productos, reducción de sustancias químicas y efectos negativos en el alimento (Chemat et al., 2011). Cabe mencionar que las aplicaciones de ultrasonido están basadas en tres métodos diferentes: aplicación directa al producto, acoplamiento con el dispositivo y sumergimiento en baño de ultrasonido con sonotrodos.

1.2.2.1. Principios de operación de ultrasonido

El ultrasonido es generado por una corriente eléctrica que se transforma mediante transductores. Se transmite a través de cualquier sustancia, sólido, líquido o gas. Los procesos alimentarios realizados usando esta tecnología se rigen principalmente por los fenómenos de cavitación y la transferencia de masa. El ultrasonido hace uso de fenómenos físicos y químicos que son fundamentalmente diferentes. De acuerdo con Alarcón-Rojo et al. (2015), cuando el sonido viaja a través de un medio, se generan ondas de compresión y rarefacción de las partículas en el medio dando como resultado la formación de cavidades y/o burbujas. Éstas eventualmente se vuelven inestables y colapsan liberando altas temperaturas y presiones, afectando materiales y tejidos biológicos a micro y macro escala.

El efecto conservador del ultrasonido está asociado con la cavitación gaseosa, lo cual se refiere a la generación de microburbujas en un medio líquido. El efecto bactericida del ultrasonido es atribuido al efecto de cavitación intracelular generada, esta se produce en aquellas regiones del líquido que se encuentran sometidas a presiones de alta amplitud. Lo cual provoca choques micro-mecánicos por la continua formación de las microburbujas que alcanzan un tamaño crítico y colapsan volviendo a su tamaño inicial, inducidas por las presiones que fluctúan en el proceso de ultrasonicación, estos choques interrumpen componentes estructurales y funciones celulares hasta el punto de lisis o muerte celular (Chemat et al., 2011).

La cavitación acústica se puede dividir en dos tipos, transitoria y estable. Lo primero ocurre cuando la cavitación burbujea, llena con gas o vapor, generando oscilaciones irregulares y finalmente la implosión. Como se mencionó, esto produce altas temperaturas locales y presiones que desintegran las células biológicas y desnaturalizan las enzimas. La burbuja de implosión produce altas fuerzas de corte en el solvente utilizado, con suficiente energía para dañar la pared o membrana celular. Por otro lado, la cavitación estable, se refiere a las burbujas que oscilan de manera regular. Para muchos ciclos acústicos, las burbujas inducen microstreaming en el líquido circundante que también puede inducir estrés en diferentes especies microbiológicas (Chemat et al., 2011).

Chemat et al. (2011) estudiaron la reacción de los microorganismos a los tratamientos con ultrasonido y encontraron que no siempre ocurre de la misma manera. La implosión de las burbujas supone la liberación de toda la energía acumulada, ocasionando incrementos de temperatura instantáneos y focales, que se disipan sin que supongan una elevación sustancial de la temperatura del líquido tratado. Sin embargo, la energía liberada, así como el choque mecánico asociadas al fenómeno de implosión, afectan la estructura de las células situadas en el microentorno. Aunque es importante resaltar, que los factores que afectan la efectividad de su inactivación son: la amplitud de las ondas de ultrasonido, el tiempo de exposición o contacto, el volumen del alimento procesado, la composición del mismo y la temperatura del tratamiento.

1.2.2.2. Influencia del ultrasonido en la eficiencia de marinado

El marinado es un método que modifica el sabor y el aroma del producto, además de que se utiliza como una técnica de conservación para una amplia variedad de productos cárnicos. Se dice que el procesamiento con ultrasonido aumenta la eficiencia del marinado debido a la infiltración de sustancias a través de los poros de la carne gracias a las ondas ultrasónicas. Chemat et al. (2011) encontraron que los contenidos de agua y de cloruro de sodio de las muestras después del tratamiento de marinado fueron más altos en muestras tratadas con ultrasonido que en muestras no sonicadas. Es decir, la migración de las sustancias del marinado al alimento incrementa usando esta tecnología.

El aumento de los tiempos de marinado genera productos más aceptables, mejorando los parámetros de color, aroma y sabor. El ultrasonido reduce el tiempo de marinado, reduce la formación de una corteza y coloración no deseada de la carne cruda. El proceso también proporciona un producto cárnico con marinado uniforme, sin riesgo al daño estructural y a la hinchazón. En la carne se han estudiado los resultados de aplicar el ultrasonido como tratamiento previo a la cocción, y se ha encontrado que mejora la calidad de la misma con respecto al rendimiento másico y a la terneza. Olivera y Cárdenas (2013) estudiaron los efectos del ultrasonido en la carne, y encontraron mejoras en la velocidad de pérdida de agua, en su firmeza, tanto fresca como cocida, y un mayor rendimiento en la cocción.

En la carne de pollo, el ultrasonido reduce el tiempo de marinado produciendo los mismos efectos positivos. Estudios recientes mencionados por Alarcon-Rojo et al. (2015) demostraron que aplicar el ultrasonido de potencia al músculo de la carne de pollo no tiene efectos significativos en el color pero conlleva a cambios texturales del alimento debido a la disminución del diámetro de la fibra en el músculo. Además, el tratamiento de la carne de aves de corral con ultrasonido en combinación con ácido láctico demostró ser un método adecuado para la inactivación y reducción del recuento total de microorganismos. Este resultado se consiguió aplicando vapor y ultrasonido inmediatamente después del sacrificio.

Cabe mencionar que la textura de la carne es dependiente de la capacidad de retención de agua de la misma la cual es, a su vez, dependiente del calentamiento o la cocción. El ultrasonido tiene la capacidad de mejorar las características asociadas a la transferencia de calor, la cual es relevante en la cocción de la carne. Cuando se le aplica un tratamiento de ultrasonido a la carne durante el marinado, estas muestras resultan con una textura más blanda o suave al cocinarse a 50 °C, a comparación de la carne sin ultrasonido. No obstante, la carne sonicada cocinada a 70 °C se presenta más dura que la carne sin ultrasonido. Por otro lado, el tratamiento de ultrasonido disminuye la pérdida de agua en la refrigeración y las pérdidas de peso en la cocción. Por consiguiente, se considera que esta tecnología puede ayudar a modificar las propiedades texturales de la carne de manera eficiente e incrementa la capacidad de retención de agua sin afectar el pH del alimento (Alarcon-Rojo et al., 2015).

Así mismo, Alarcon-Rojo et al. mencionan que un estudio realizado por McClements en 1995 demostró la efectividad que tiene el ultrasonido en propiedades como la capacidad de retención de agua, firmeza y cohesión de productos cárnicos en comparación a la carne sin tratamiento. Además, se encontraron diversas ventajas del procesamiento ultrasónico ya que, como se mencionó, se obtiene una reducción del tiempo de marinado y mejora en las propiedades fisicoquímicas y texturales de la carne, sin generar modificaciones relevantes en el color de ésta. Otras ventajas que se encontraron de esta tecnología son: el incremento de la transferencia de masa debida al aumento de la difusión de los ingredientes gracias a la intensidad del ultrasonido, el rendimiento de la carne y la reducción de microorganismos.

1.3. Nanotecnología en alimentos

La nanotecnología es definida como la ciencia que se encarga del estudio y el control de la materia en dimensiones de 1 a 1000 nm (escala nanométrica). Esta tecnología se ha aplicado en la agricultura, medicina, industria textil, cosméticos, alimentos y salud pública, gracias a su habilidad única de incrementar la solubilidad y biodisponibilidad, además de la protección de compuestos bioactivos mientras éstos son procesados o almacenados. Letchford y Burt (2006) definen a las nanopartículas como partículas de tamaño coloidal, en un estado no consolidado, agregado o aglomerado, que poseen diámetros entre 1 y 1000 nm. Las cuales pueden estar compuestas de diversos materiales, incluyendo lípidos, polímeros y materiales inorgánicos, que pueden tener diferentes aplicaciones.

En la industria de alimentos la aplicación de la nanotecnología es extensa debido a la manipulación de ingredientes y la formulación de productos (Yusop et al., 2011). Ésta ha emergido en el sector agroalimentario como un avance tecnológico en el desarrollo y la transformación de los alimentos debido a que los consumidores actuales demandan alimentos seguros y tienen la necesidad de adquirir productos que cumplan con las características de calidad y nutricionales adecuadas para su consumo. Por esta razón, la tecnología a escala nanométrica ha tenido el potencial de satisfacer las necesidades del consumidor, incrementar la producción global de los alimentos, además de aumentar el valor nutricional, la calidad y seguridad de éstos (King et al., 2018).

El rápido desarrollo de la nanotecnología ha transformado la ciencia de los alimentos, especialmente del procesamiento, envasado, almacenamiento, transporte y funcionalidad de los mismos, incluso aspectos como la seguridad alimentaria (Bajpai et al., 2018). Las nuevas tecnologías, incluyendo la nanotecnología, proporcionan ciertos parámetros a los alimentos, como la actividad antimicrobiana, además de que se han utilizado para desinfectar de manera eficiente y controlar la carga microbiológica en los alimentos. La aplicación más importante en esta industria es la incorporación de nanomateriales en los envases y los contenedores de almacenamiento, con la finalidad de extender la vida útil de los productos manteniendo su estabilidad.

Aunque, existen diversos beneficios de la utilización de nanosistemas durante las fases de la cadena alimentaria, con el objetivo de mejorar la calidad de los alimentos durante su producción y conservación. La industria avícola puede beneficiarse del uso de las nanopartículas mediante la reducción y prevención de la contaminación por bacterias. Con respecto a la carne de pollo comercial, ésta ha sido identificada como una de las fuentes más importantes de contaminación de *Salmonella* y *Campylobacter* en alimentos. No obstante, la nanotecnología puede representar una tecnología relevante en esta industria debido a su potencial de mejorar la calidad de los productos mediante la reducción de carga microbiana, ya sea directamente en el producto o en los equipos e instrumentos de la plantas procesadoras (King et al., 2018).

Por otro lado, de acuerdo a Bajpai et al. (2018), la nanotecnología tiene un amplio rango de aplicaciones relacionados a los alimentos. Dentro de éstas se encuentra la incorporación de sustancias específicas en productos alimenticios para que estos desarrollen ciertas características funcionales. Diversas investigaciones confirman que las nanopartículas mejoran la seguridad alimentaria debido al incremento de su vida útil. Y cabe mencionar que éstas tienen la capacidad de aumentar el valor nutricional en los alimentos, sin modificar su sabor ni sus características físicas finales. Teniendo en cuenta que los alimentos naturalmente contienen nanoestructuras orgánicas, como son las proteínas, carbohidratos y lípidos; estos mismos compuestos pueden servir para construir nanoencapsulantes o nanoemulsiones de grado alimenticio.

1.3.1. Nano encapsulación de aceites esenciales

Hu et al. (2018) definen a los aceites esenciales como líquidos naturales y aromáticos obtenidos de flores, hojas, frutas, tallos y otras partes de las plantas, los cuales pueden ser preparados mediante la destilación, fermentación, entre otros. Éstos tienen propiedades antibióticas, antimicrobianas y antioxidantes, las cuáles se deben al sinergismo de sus componentes; una mezcla de compuestos volátiles, hidrocarburos aromáticos, ésteres, fenoles y otras sustancias naturales. Además, los aceites esenciales no tienen efectos negativos en el organismo gracias su bajo grado de toxicidad. En general, los aceites esenciales tienen alta volatilidad, baja solubilidad en agua, proporcionan sabor y aroma, aunque, es importante resaltar, que sus componentes principales son fáciles de oxidar y deteriorar al entrar en contacto con el oxígeno, la luz o el calor (Granata et al., 2018).

Actualmente, los productos antimicrobianos naturales han atraído la atención del consumidor, gracias al incremento de su preocupación por la seguridad alimentaria. La contaminación microbiológica en alimentos es una de las causas principales de su deterioro, que además conlleva a la alteración de sus componentes nutricionales y los parámetros de calidad fisicoquímicos y sensoriales. El control de la contaminación bacteriana en alimentos frescos o procesados se puede realizar mediante la sanitización con productos químicos, aunque no siempre resulta efectivo y en ocasiones puede modificar la calidad del alimento. Además de que los consumidores prefieren alimentos libres de aditivos sintéticos y de conservadores (Granata et al., 2018).

En este contexto, los aceites esenciales vegetales han sido reconocidos como compuestos seguros que representan una alternativa natural de conservación de alimentos gracias a sus propiedades antimicrobianas, sin el uso de sustancias químicas (Granata et al., 2018). No obstante, la interacción de la matriz de los alimentos con los aceites esenciales resulta complicada. Es por ello que la nanoencapsulación de estos componentes representa una alternativa para su incorporación en los alimentos. De hecho, esta técnica presenta ventajas como la reducción de la volatilidad, el incremento de la solubilidad, la estabilidad física, y la reducción de la interacción de los aceites esenciales con los ingredientes del alimento (Bazzano et al., 2016).

Bazzano et al. (2016) definen a la nanoencapsulación como el proceso mediante el cual se introducen sustancias bioactivas en una matriz, con la finalidad de que se cumpla su funcionalidad. Hu et al. (2018), mencionan que la nanoencapsulación involucra la liberación controlada de compuestos y la estabilidad de sabores. Este proceso proporciona efectividad en la estabilización de los aceites esenciales y previene la pérdida de los compuestos volátiles. Una de las aplicaciones para los sistemas dispersos nanoparticulados es su uso como acarreadores de entidades con actividad biológica (principios activos). Esta área se enfoca en el desarrollo de biomateriales nanoestructurados para construir sistemas que transporten y entreguen activos de manera controlada.

Adicionalmente Hu et al. (2018) estudiaron la efectividad de nanocápsulas compuestas de aceites esenciales y demostraron un efecto antimicrobiano de larga duración en contra de bacterias como *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* y *Staphylococcus aureus*. Aunque la acción antiséptica de éstos se manifiesta a un gran número de bacterias patógenas.

1.3.2. Aceite esencial de romero

El romero (*R. officinalis L.*) es una de las plantas con potencial de acción medicinal o funcional que tiene la característica de poseer un elevado contenido en sustancias o principios activos, con propiedades químicas, bioquímicas u organolépticas muy específicas, que permiten su utilización con fines terapéuticos (plantas medicinales), aromáticos (plantas aromáticas o esencias) y dietéticos o gastronómicos (plantas empleadas como condimentos). En México el romero crece y es utilizado en los estados de Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Sonora, Tlaxcala y Veracruz (Ávila-Sosa et al., 2011).

Es preciso destacar que los aceites esenciales (EOs) son agentes antimicrobianos, con dos características principales: su origen natural, con lo cual brindan mayor seguridad a los consumidores y al medio ambiente; su bajo riesgo de resistencia microbiana, al estar formados por mezclas de varios compuestos que, aparentemente, presentan modos de acción diferente, con lo cual resulta más difícil la adaptación del microorganismo (Jayasena y Jo, 2013).

Particularmente, el aceite esencial de romero, de manera general, tiene una gran capacidad antioxidante y antimicrobiana. Diversos estudios han confirmado su eficacia y se ha determinado que una característica del extracto de romero es que su actividad antioxidante se incrementa conforme el pH disminuye, posiblemente debido a que tanto el ácido carnósico como el canosol son más estables y su efecto protector puede durar más tiempo durante la oxidación (Ávila-Sosa et al., 2011). Según Jayasena y Jo (2013), en cuanto a la aplicación en pollo, pescado, carnes y productos cárnicos, los aceites esenciales de orégano, romero, tomillo, albahaca y clavo son los que han presentado mayor potencial para ser empleados como antimicrobianos y antioxidantes.

La actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos etanólicos de romero en un producto cárnico da como resultado un efecto similar a los antioxidantes sintéticos, por lo que el aceite esencial de romero tiene la posibilidad de usarse como aditivo en carnes, como la de pollo. A su vez, Ávila-Sosa et al. (2011) mencionan que el uso de extracto de romero se ha estudiado ampliamente en pollo y carne como un antioxidante natural. La carne es muy susceptible a la oxidación debido a factores intrínsecos como el tipo de carne, procesamiento y condiciones de almacenamiento. Sus investigaciones demostraron que la aplicación de aceite esencial de romero en carne de pollo cocida disminuye su susceptibilidad a la rancidez oxidativa, lo cual reduce la disminución de la calidad y mantiene sus propiedades sensoriales.

Los antioxidantes naturales, incluyendo el aceite esencial de romero, se han estudiado ampliamente en su aplicación en carne de pollo con la finalidad de limitar la oxidación de lípidos. Antes del cocimiento, las reacciones de los radicales libres causan la oxidación en las carnes, cambiando el sabor, color y aroma de la carne. Durante el cocimiento, los lípidos en la carne pueden generar que los compuestos volátiles se oxiden y produzcan sabores y olores distintos. Por otro lado, al llevar a cabo el almacenamiento de carne en refrigeración, los volátiles, como los alcoholes, aldehídos, furanos e hidrocarburos, aumentan su concentración durante el cocimiento. Se ha demostrado que el aceite esencial de romero evita la oxidación de lípidos y la formación de olores (Ávila-Sosa et al., 2011).

La incorporación de aceites esenciales en los alimentos en nanocápsulas resulta positiva para el mantenimiento de los componentes de los mismos. Además, se ha demostrado que las nanocápsulas de aceite esencial, como las de romero, permiten obtener un mayor tiempo de vida de anaquel durante el almacenamiento en refrigeración de alimentos (Hu et al., 2018).

1.4. Envasado a vacío

El envasado a vacío es una forma efectiva de prolongar la vida útil de un producto y protegerlo contra los elementos externos. El vacío es un método de conservación de alimentos que consiste en extraer el aire que rodea al producto que se va a envasar. Si el proceso se realiza de forma adecuada, la cantidad de oxígeno residual es inferior al 1%. De este modo se consigue una atmósfera libre de oxígeno con la que se retarda la proliferación de bacterias y hongos que necesitan este elemento para sobrevivir, lo que posibilita una mayor vida útil del producto.

La tecnología de envasado de alimentos está continuamente renovándose. Los consumidores demandan envases de calidad que cumplan con la legislación, el aumento de la vida útil de los productos, el cuidado del medio ambiente, además de la autenticidad y seguridad alimentaria. Las estrategias de optimización del envasado incluyen la aplicación de tecnologías a los envases para aumentar la seguridad de los productos y reducir la proliferación de microorganismos (Realini et al., 2014).

El envase sirve como una protección al alimento, y cualquier defecto en el mismo puede generar una exposición al medio ambiente propenso a la contaminación. La calidad del material de empaque usado para los alimentos es un factor importante para la seguridad de éstos. Por consiguiente, es esencial asegurar que éste no sea dañado durante el procesamiento, almacenamiento y transporte del alimento (Meltem, 2009). Las nuevas tendencias en el envasado de carne y productos avícolas incluyen el uso de materiales plásticos, como el policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS), y variedades de polietileno (alta y baja densidad), en combinación con un sistema de atmósfera modificada o envase a vacío (Gertzou et al., 2017).

Actualmente, los materiales de envases, como las bolsas de polietileno de baja y alta densidad, son comúnmente utilizados para la refrigeración en el mercado de productos avícolas. El uso de estos envases en combinación con el vacío y las bajas temperaturas asegura el mantenimiento de la calidad de los productos. En la carne de pollo, la utilización de envases a vacío ha incrementado su vida útil en un 50%. Ya que la vida de anaquel de la carne de pollo (6 a 8 días) puede incrementarse hasta 15 o 17 días cuando se envasa a vacío debido a la inhibición de la mayoría de la microbiota aerobia (Guo et al., 2018).

Se han estudiado nuevos sistemas de envasado para mantener tanto la calidad, así como las características sensoriales de los productos a lo largo de la cadena de distribución hasta el momento de su consumo. Cabe resaltar que se han obtenido resultados prometedores aplicando vacío a los envases e incluso en un sistema de atmósferas modificadas. Específicamente, el envasado al vacío se complementa con otros métodos de conservación, ya que los alimentos una vez envasados pueden ser refrigerados o congelados. No obstante, cabe resaltar que Guo et al. (2018) mencionan que al eliminar el oxígeno de la carne, se pueden observar algunas modificaciones en el color de la carne fresca, y la eliminación total de éste puede resultar contra productiva en la apariencia del producto final.

El oxígeno preserva el color brillante y deseable de la carne debido a la oximioglobina. Sin embargo, éste puede promover la oxidación de lípidos y de mioglobina de manera rápida, lo cual genera una descoloración en el alimento, debida a la formación de metamioglobina (Guo et al., 2018). Por otro lado, es importante mencionar que la dureza y textura de las carnes y pescados sí se mantienen cuando estos se conservan en un envase a vacío, además de que se reducen las pérdidas de sabor y de peso.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1. Problemática

La carne de pollo es susceptible a modificaciones en sus parámetros de calidad, debido a su composición y propiedades fisicoquímicas. Además, cuando se encuentra en estado fresco, ésta tiene peligro de contaminación en la superficie, lo cual genera una alteración en su color, actividad acuosa, pH, y firmeza, afectando significativamente la aceptación del consumidor. No obstante, su conservación en refrigeración es limitada debido al corto tiempo de vida útil en la que se mantiene sin alteraciones en sus propiedades.

Existen tecnologías emergentes, como la luz ultravioleta germicida (UV-C), la cual se aplica como tratamiento de desinfección y, en las condiciones adecuadas, no afecta la calidad sensorial de los alimentos. Adicionalmente, el ultrasonido representa un método eficaz para infiltración de marinado en la carne y permite ejercer con mayor facilidad su efecto sobre la conservación del producto. Existen otros adyuvantes del proceso, como el aceite esencial de romero, el cual funciona como agente antimicrobiano y antioxidante, es posible su nano encapsulación permitiendo la liberación controlada del activo, obteniendo un mayor tiempo de conservación del alimento durante su almacenamiento en refrigeración.

Sin embargo, en la industria avícola no se han evaluado ni controlado los parámetros de calidad físicos, fisicoquímicos y texturales de la carne de pollo; incluida la conductividad eléctrica, la capacidad de retención de agua y la firmeza de la misma durante su maduración y almacenamiento, con métodos mínimamente destructivos. Además de que existe escasa información acerca de la aplicación de tratamientos en productos avícolas utilizando tecnologías emergentes.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la irradiación UV-C y/o infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanocápsulas de aceite esencial de romero sobre los parámetros físicos, fisicoquímicos y texturales de fajitas de pollo envasadas a vacío y almacenadas en refrigeración.

2.2.2. Objetivos Particulares

Objetivo Particular 1

Analizar la influencia de los tratamientos de irradiación UV-C y/o infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanocápsulas de aceite esencial de romero en fajitas de pollo envasadas a vacío y almacenadas a 2 °C, sobre la pérdida de peso, líquido drenado y capacidad de retención de agua.

Objetivo Particular 2

Determinar la efectividad de los tratamientos de irradiación UV-C y/o infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanopartículas de aceite esencial de romero, mediante los parámetros de calidad fisicoquímicos en fajitas de pollo marinadas y envasadas a vacío y su relación sobre el deterioro del producto durante su almacenamiento a 2 °C.

Objetivo Particular 3

Determinar mediante pruebas de punción y de resistencia al corte, la influencia de los tratamientos de irradiación UV-C y/o infiltración ultrasónica de un marinado con o sin nanocápsulas de aceite esencial de romero sobre la firmeza de las fajitas de pollo almacenadas a 2 °C.

Objetivo Particular 4

Analizar el efecto de la irradiación UV-C y/o infiltración ultrasónica de un marinado con y sin nanocápsulas de aceite de romero sobre los cambios de color en fajitas de pollo envasadas a vacío y refrigeradas.

2.3. Cuadro metodológico

La metodología de investigación experimental y las actividades realizadas se resumen en el siguiente cuadro metodológico.

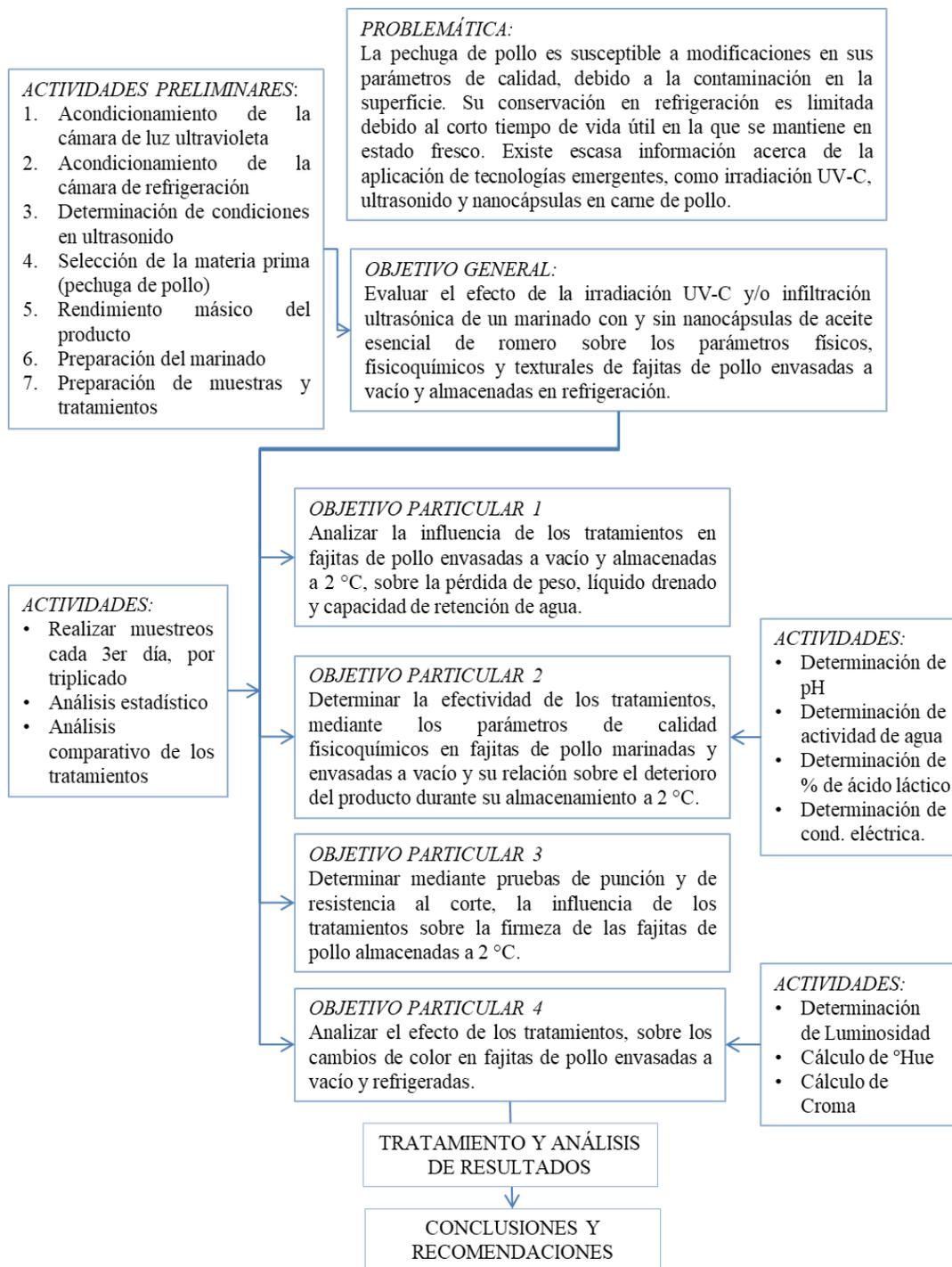


Figura 3. Cuadro metodológico.

La descripción de cada una de las actividades del cuadro metodológico, Figura 3, se presenta a continuación.

2.4. Actividades preliminares

2.4.1. Acondicionamiento de la cámara de luz ultravioleta

La irradiación de las fajitas de pollo se realizó en una cámara de refrigeración, de dimensiones externas de 1.9405 m de alto, 0.7103 m de ancho y 0.72 m de largo. Y de dimensiones internas de 0.73 m de alto, 0.6105 m de ancho y 0.5808 m de largo. La cámara se recubrió por la parte interior con aluminio, con la finalidad de incrementar la reflexión de la luz UV-C y homogenizar la intensidad de la irradiación. Se colocó la lámpara de luz UV-C (254 nm) de 15 W (*UVP* modelo *XX-15S*) en la rejilla superior de la cámara, a una distancia de 18 cm respecto a la ubicación de la zona de irradiación como se observa en la Figura 4.

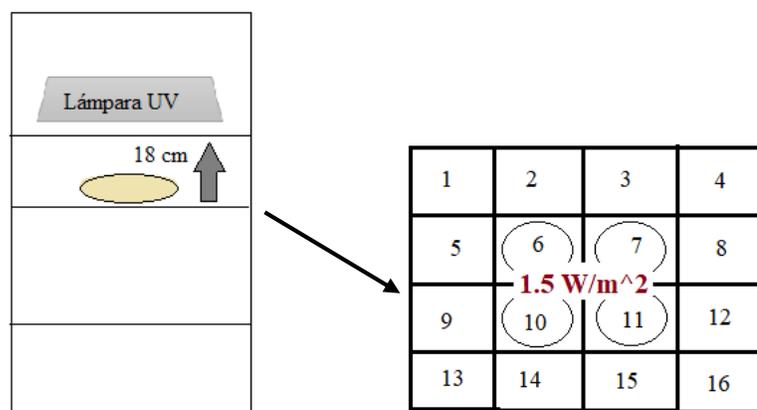


Figura 4. Esquema de distribución de la muestra en la cámara UV.

La incidencia de luz UV-C se determinó en diferentes puntos de la rejilla, Figura 4, a través de un medidor de luz ultravioleta marca *Digital Instruments* modelo *Lutron SP-82 UV*. La determinación de la intensidad de luz ultravioleta (UV-C) en la parte central de la rejilla fue de 1.5 W/m^2 , y cabe mencionar que el tiempo de irradiación de luz UV-C en las fajitas de pollo se estableció de 2 min por lado.

2.4.2. Acondicionamiento de la cámara de refrigeración

La cámara de refrigeración (refrigerador comercial), ubicada en el laboratorio 16 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, fue acondicionada para el almacenamiento de las fajitas de pollo. Las condiciones y el área de trabajo se establecieron a partir del monitoreo de la temperatura y la humedad relativa en dos secciones de la cámara de refrigeración, correspondientes a la rejilla superior y la inferior; Figura 5. Se utilizó el termohigrómetro digital marca *Lascar Electronics* modelo *USB-2 Data Logger* con la finalidad de mantener la cámara a una temperatura constante de 2 ± 1 °C y una humedad relativa del 70 %. Se obtuvo un comportamiento promedio de la misma y se registró la distribución de temperaturas durante el almacenamiento del producto.

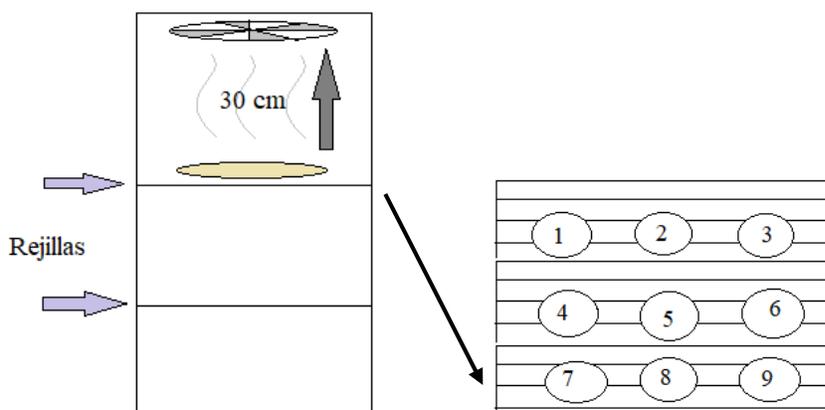


Figura 5. Cámara de refrigeración, esquema de posiciones de medición.

2.4.3. Determinación de condiciones de ultrasonido

Se empleó un procesador ultrasónico marca Hielscher® UP 200Ht, seleccionándose un sonotrodo de 40 mm de diámetro Hielscher® sonotrodo S26d40, el equipo opera a una frecuencia de 26 kHz, intervalo de control ± 1 kHz y un rango de temperatura de 5 a 40 °C. Además de que puede variar la amplitud mecánica entre 20 y 100 %. Considerando que el valor establecido deberá permanecer constante durante su operación para el tratamiento de las fajitas de pollo, la amplitud empleada fue del 80 % con ciclos de pulsos del 50 % y un tiempo total de 15 s de tratamiento de infiltración ultrasónica del marinado con y sin nanocápsulas cargadas con aceite esencial de romero.

2.4.4. Selección de la materia prima (pechuga de pollo)

La materia prima (pechuga de pollo) se adquirió en una pollería de Tlalnepantla, Estado de México; fresca, sin piel, sin hueso, sin compresión mecánica del tejido y de un peso aproximado de 1 kg. La pechuga se cortó en fajitas de (7 x 1.5 x 0.8) cm.

2.4.5. Rendimiento másico del producto

La determinación del rendimiento másico del producto se realizó con respecto al peso inicial de la pechuga de pollo (aproximadamente 1 kg) por cada tratamiento, y el peso resultante al eliminar el hueso y la piel (≈ 600 g). Se registró el peso de los 6 filetes de pechuga de pollo (≈ 100 g) con los cuales se obtuvieron las fajitas de espesor ≈ 0.8 cm.

2.4.6. Preparación del marinado

El marinado contenía 100 mL/L de vinagre de manzana, 75 g/L de NaCl. Con la finalidad de incorporar de manera adecuada los ingredientes, se calentaron 825 mL de agua a 60 °C, y una vez disueltos se procedió al marinado de las fajitas de pollo a temperatura ambiente. El marinado con nanocápsulas de aceite esencial de romero se preparó calentando 525 mL de agua, se adicionó el vinagre y la sal a 60 °C. Posteriormente, se esperó a que la temperatura del líquido disminuyera a ≈ 35 °C para adicionar 300 mL de la dispersión de nanopartículas proporcionada previamente, las cuales se hicieron de zeína y se obtuvieron por nanoprecipitación. Considerando que esta dispersión contenía 1 g/L de aceite esencial de romero y tenía una talla de partícula de 150 ± 180 nm. El tiempo total de marinado para cada lote fue de 5 min, los ensayos se realizaron por triplicado.

2.4.7. Preparación de muestras y tratamientos

Previo a los tratamientos realizados, las fajitas de pollo de (7 x 1.5 x 0.8) cm se desinfectaron durante 10 min para eliminar la carga microbiana inicial empleando un microbicida (plata ionizada 1 mL/L).

Posteriormente, se sumergieron en el marinado durante 5 min, se retiró el exceso de líquido y se aplicó el tratamiento correspondiente; según la tabla de variables que se describe en el apartado 2.5.1. Los tratamientos realizados fueron: Control (fajitas sin ningún tratamiento), Fajitas marinadas, UV-C, Ultrasonido, UV-C/ultrasonido, Marinado con nanocápsulas, Nanocápsulas/UV-C, Nanocápsulas/ Ultrasonido y Nanocápsulas/UV-C/Ultrasonido.

El lote Control de fajitas de pollo sólo se desinfectó, se envasó y se almacenó a 2 °C. Los demás lotes fueron marinados como se menciona en el apartado 2.4.6., el lote de fajitas marinadas sólo se marinó, se envasó y almacenó. Por su parte, para los lotes sometidos a ultrasonido, se preparó el marinado correspondiente (con o sin nanopartículas) y se colocaron las fajitas en el líquido por medio de inmersión. Una vez colocadas, se posicionó el Hielscher® sonotrodo S26d40 dentro del marinado y se procedió al tratamiento con una amplitud de onda del 80 % con ciclos de pulsos del 50 % y un tiempo de sonicación de 15 s a 26 kHz. El tiempo total de marinado, con y sin ultrasonido, fue de 5 min.

En los lotes sometidos a tratamiento de irradiación de luz UV-C, se preparó el marinado (con o sin nanopartículas), se marinaron las fajitas, se retiró el exceso de líquido, y posteriormente se irradiaron en la cámara UV-C durante 2 min en cada lado de la fajita. Para los lotes con tratamiento de UV/Ultrasonido, primero se llevó a cabo el tratamiento ultrasónico durante el tiempo de marinado y finalmente se irradiaron de luz (UV-C).

El proceso de envasado en la campana marca *Multivac*®, Figura 6, en bolsas de polietileno de alta densidad de 10 x 15 cm, aplicando un vacío de 50 mBar. El envasado se muestra en la Figura 7, cada bolsa contenía un aproximado de 20 g de muestra, con 3 fajitas de pollo.



Figura 6. Envasadora *Multivac*®.



Figura 7. Envasado a vacío del producto.

2.5. Diseño Experimental

En la Tabla 3 se describen las variables de trabajo y la técnica o instrumento de medición.

2.5.1. Variables

Tabla 3. Factores y niveles de variación involucrados en el diseño experimental.

Factores de Variación	Niveles de Variación	Factores Dependientes	Técnica/ Instrumento
Irradiación UV-C	-Con radiación UV-C -Sin radiación UV-C	L*, a*, b* (color)	Colorimetría (Colorímetro Konica Minolta® CR-300)
		Pérdida de peso	Balanza Digital (Velab®) Método descrito por Honiken (1998).
		Líquido drenado	
		% Acidez	Titulación volumétrica Método 33.009 el AOAC.
Nanocápsulas de aceite esencial de romero	-Con nanocápsulas -Sin nanocápsulas	Aw	Higrómetro (Novasina® LabSwift-aw)
		pH	Potenciómetro (Hanna Instruments® HI 213) Método 33.006 del AOAC.
		Conductividad eléctrica	Conductímetro (OHAUS® Starter 3100C)
		Capacidad de retención de agua	Texturómetro (Brookfield® CT3)
Infiltración ultrasónica	-Con ultrasonido -Sin ultrasonido	Resistencia al Corte (firmeza)	
		Prueba de punción (firmeza)	

La determinación de las variables de respuesta de la Tabla 3 se realizó mediante muestreos cada tercer día de almacenamiento de las fajitas de pollo a 2 ± 1 °C, considerando que éstos se realizaron por triplicado para cada lote.

2.5.2. Justificación de variables

Actualmente, el consumo de la carne de pollo ha aumentado significativamente debido a sus propiedades nutritivas y a su accesibilidad económica. No obstante, en ocasiones su contaminación es inevitable, lo cual propicia a cambios en sus propiedades físicas y fisicoquímicas causando su deterioro y por consiguiente, la pérdida de calidad. La luz ultravioleta de onda corta (UV-C) es una tecnología que permite extender el tiempo de vida útil debido a que es eficaz en la desinfección de los alimentos sin alterar sus parámetros de calidad.

La tendencia es la reducción del consumo de energía, lo que nos permite tomar en consideración a las nuevas alternativas de conservación, tecnologías verdes y emergentes, como el ultrasonido que representa un método de procesamiento y conservación. El cuál, en la industria avícola es útil para infiltrar el líquido de marinado y permite disminuir el tiempo de tratamiento, ejerciendo con mayor facilidad su efecto sobre la conservación del producto. Por su parte, la nanotecnología permite emplear otros adyuvantes del proceso, como el aceite esencial de romero, puesto que al nano encapsular este componente es posible tener un control sobre la liberación del activo debido al incremento de su solubilidad. Este aceite tiene propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

2.5.3. Análisis estadístico

La comparación de los tratamientos se llevó a cabo realizando un ANOVA empleando el software estadístico MINITAB[®]18. El comportamiento de las variables y las diferencias entre los tratamientos se evaluaron mediante una prueba Tukey ($\alpha = 0.05$).

2.6. Métodos y técnicas de control

2.6.1. Evaluación del color

La evaluación del color es relevante debido a que ésta establece la calidad sensorial de los alimentos frescos y procesados; además de que se pueden determinar los cambios que se generan en el producto, a consecuencia del procesamiento y los métodos de conservación. Se utilizó el Colorímetro marca *Konica Minolta*[®] modelo *CM-600d*, empleando un iluminante D65 a 10 ° del observador. Una vez prendido el equipo, éste se calibró empleando el blanco. La medición de color de la superficie de las fajitas de pollo se llevó a cabo por triplicado.

Los parámetros de color obtenidos por el equipo se expresan en la escala CIELAB (L^* , a^* , b^*). L^* representa la luminosidad, ésta se refiere a la expresión del color relacionado con la capacidad de refracción de la luz de un cuerpo. Se establece en una escala de 0 a 100, donde el 0 representa el color negro, mientras que la luminosidad de 100 es el color blanco. Una vez obtenidos a^* y b^* en la evaluación del color, se calculó el ángulo de tonalidad ($^{\circ}$ Hue) y la cromaticidad de la siguiente manera:

$$^{\circ}\text{Hue} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Croma} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

El ángulo Hue, ecuación 1, representa la tonalidad del color de un objeto, de tal manera que se relaciona con el color del alimento (rojo, naranja, verde, azul, etc). En el apartado 3.2.1.3 se muestra el círculo de color donde se ubica la tonalidad correspondiente a las fajitas de pollo. Mientras que el croma, ecuación 2, define la saturación de un color, es decir si es más brillante, oscuro o grisáceo. La cromaticidad se define como la intensidad del color, indica el grado de saturación del tono en la superficie analizada. Ambos son útiles como indicadores de la madurez de alimentos frescos y procesados.

2.6.2. Pérdida de peso

La evaluación del peso de la pechuga de pollo es relevante debido a que es un parámetro de calidad físico importante para el consumidor. La determinación de la pérdida de peso de las fajitas de pollo almacenadas a 2 °C se realizó por diferencia de pesos medida con la balanza analítica *Velab*® (+/- 0.01). Se pesó la muestra sin el envase, un aproximado de 20 g por bolsa. Una vez obtenido el resultado, la pérdida de peso se expresó en porcentaje (%). Se realizó por triplicado cada tercer día de almacenamiento.

Por otro lado, para la evaluación de la pérdida de peso por cocción se realizó de acuerdo al método descrito por Honiken (1998). Se registró el peso de las fajitas al inicio del muestreo y se cocinaron a una temperatura de 75 °C. Se dejaron enfriar y se pesaron, el valor fue calculado como se indica en la ecuación 3 y reportado en porcentaje.

$$\% \text{Pérdida de peso cocción} = \frac{(\text{peso inicial de muestra} - \text{peso cocción})}{(\text{peso inicial de muestra})} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

2.6.3. Líquido drenado

El líquido drenado proveniente de las fajitas de pollo durante su almacenamiento en refrigeración a 2 °C, se determinó de acuerdo al método descrito por Honikel (1998). Se tomó el peso inicial de la muestra antes de colocarla en el envase. Una vez transcurrido el tiempo de almacenamiento para cada muestreo, se pesaron las muestras sin envase y el resultado se calculó mediante la ecuación 4, el líquido drenado del alimento se reportó en porcentaje (%).

$$\text{Líquido drenado (\%)} = \frac{(\text{peso inicial de muestra} - \text{peso en día de muestreo})}{(\text{peso inicial de muestra})} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

2.6.4. Resistencia al corte

Se empleó el texturómetro *CT3* de *Brookfield*®, equipado con celda de carga de 25 kg. Para la evaluación de la resistencia al corte, se empleó una celda Warner-Braztler mostrada en la Figura 8, se consideró una distancia de 20 mm y una carga de activación de 0.07 N. La prueba se llevó a cabo a una velocidad de 1 mm/s, y los resultados obtenidos se expresaron como la firmeza en N, considerada la carga necesaria para provocar el corte de las fajitas de pollo en relación con el espesor de las mismas. Todas las pruebas se realizaron por triplicado cada tercer día durante los 11 días de almacenamiento de las muestras a 2°C.



Figura 8. Prueba de resistencia al corte de fajitas de pollo.

2.6.5. Prueba de punción

Con la finalidad de evaluar la firmeza de las fajitas de pollo en relación con la resistencia a la punción, se empleó una sonda de penetración de 4 mm de diámetro. La prueba se llevó a cabo a una velocidad de cruceta de 2 mm/s y una carga de activación de 0.07 N, empleando el texturómetro *CT3* de *Brookfield*®, Figura 9. Se registró la firmeza de las muestras a la punción, en relación con la carga máxima de penetración (N).



Figura 9. Prueba de punción a fajitas de pollo.

2.6.6. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua de fajitas de pollo se determinó utilizando una modificación del método de prensa de papel filtro descrita por Qiao et al. (2001), según lo indicaron Wierbicki y Deatherage en 1958. El método se adaptó utilizando el texturómetro *Brookfield*[®] CT3, Figura 10, mediante la colocación de una fajita de pollo entre dos papeles filtro de 5 cm de diámetro, dimensiones iguales a la sonda utilizada, los cuales fueron llevados previamente a peso constante.

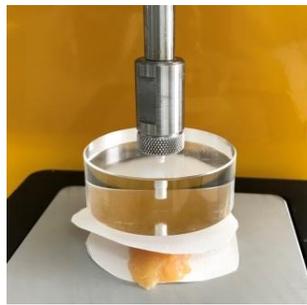


Figura 10. Prueba de capacidad de retención de agua de fajitas de pollo en texturómetro.

El principio del método es la compresión del alimento, presionando con una carga de activación inicial de 0.07 N. La prueba se llevó a cabo aplicando una fuerza de compresión constante de 10 N durante 20 s, auxiliándose de un cilindro de acrílico (TA25/1000) de 50.8 mm de diámetro y 20 mm de largo. A partir de estos datos y el valor de humedad del alimento, se calculó la CRA de la muestra con base en la ecuación 5. El valor obtenido será en g de agua por 100 g de agua en muestra.

$$CRA \left(\frac{g \text{ de } H_2O}{100g \text{ } H_2O} \right) = \frac{(m_1 * H) - (m_2 - m_3)}{(m_1 * H)} * 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde: m_1 es la masa inicial del papel filtro, antes de ponerlo a peso constante y antes de la prueba; H es la humedad teórica de la carne de pollo, m_2 es el masa del papel filtro después de la prueba y m_3 es la masa del papel filtro llevado a peso constante después de la prueba.

2.6.7. Determinación de actividad de agua

La determinación de la actividad de agua de las fajitas de pollo se realizó en el higrómetro marca *Novasina*[®] modelo *Lab Swift-aw*, un medidor de la fracción de agua libre. Se calibró mediante celdas que contienen sales de humedad estándar (0.11aw, 0.33aw, 0.58aw, 0.75aw, 0.84aw y 0.90aw). Una vez calibrado, se colocó una muestra homogénea y triturada en una celda. Se colocó dentro del equipo y se esperó al término de la prueba. La prueba se realizó por triplicado cada tercer día de almacenamiento de las fajitas de pollo.

2.6.8. Determinación de pH

La determinación de pH se realizó con el potenciómetro digital *Hanna Instruments*[®] modelo *HI 208*. Para llevar a cabo las mediciones, previamente se calibró el equipo con soluciones buffer de 4 y 7 en la escala de pH. La muestra fue triturada y diluida con agua destilada para llevar a cabo la medición, la cual se realizó de acuerdo a la técnica 33.006 del AOAC (1975).

2.6.9. Determinación del porcentaje de ácido láctico

La acidez total por volumetría se determinó mediante una titulación ácido-base con una solución de NaOH a 0.1 N, utilizando fenolftaleína como indicador. Para la obtención del porcentaje de acidez, se midió el volumen gastado necesario para neutralizar el ácido. Se calculó el porcentaje de acidez, ecuación 6, de acuerdo a la técnica 33.009, AOAC (1975).

$$\text{Ácido láctico (\%)} = \frac{(m_{eq} * V * N * V_{dilución})}{W} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde, m_{eq} son los miliequivalentes para el ácido a cuantificar (ácido láctico), V es el volumen gastado de NaOH, N es la normalidad de la solución de NaOH, $V_{dilución}$ es el volumen de agua utilizado en la dilución y W es el peso o volumen de muestra.

2.6.10. Determinación de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una propiedad característica de la carne, es una medida de la concentración y movilidad de los iones. La unidad en el Sistema Internacional para conductividad es el siemen (S). La medición de conductividad es un indicador de integridad de la membrana en la carne (Saelin et al., 2016).

La evaluación de la conductividad eléctrica de las fajitas de pollo se realizó de acuerdo al método modificado de Yao et al. (2011). Aproximadamente 5 gramos de la muestra fueron triturados y homogeneizados con 50 mL de agua destilada. La conductividad eléctrica se evaluó utilizando el conductímetro marca *Ohaus*[®] modelo *ST3100C*, se calibró previamente con el buffer estándar de cloruro de potasio 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados actividades preliminares

3.1.1. Acondicionamiento de la cámara de luz ultravioleta

La Tabla 4 muestra la distribución de intensidad de luz UV-C en la rejilla superior de la cámara de luz ultravioleta, Figura 4, expresada en W/m^2 . Se encontró que la incidencia de UV-C es óptima en los cuatro puntos centrales para la radiación de carne de pollo, es por esta razón que la irradiación se realizó en esa área (60 cm^2), como método de desinfección.

Tabla 4. *Distribución de la intensidad de luz UV-C en la cámara.*

0 W/m^2	0 W/m^2	0 W/m^2	0 W/m^2
0.67 W/m^2	1.5 W/m^2	1.5 W/m^2	0.68 W/m^2
0.99 W/m^2	1.5 W/m^2	1.5 W/m^2	1.1 W/m^2
0.02 W/m^2	0.07 W/m^2	0.09 W/m^2	0.05 W/m^2

La intensidad de luz UV-C se utilizó para determinar la dosis aplicada a las fajitas de pollo, y por consiguiente, el tiempo de exposición del tratamiento. Los niveles de incidencia fueron elegidos con base en estudios previos, donde se realizó un tratamiento de irradiación de luz ultravioleta (UV-C) a pechuga de pollo. Se encontró que utilizando una intensidad de luz de 2 W/m^2 se elimina gran parte de la carga microbiana y se conservan las propiedades fisicoquímicas de la pechuga de pollo, tales como el pH (Chun et al., 2010). Por consiguiente, se estableció la intensidad de luz UV-C de 1.5 W/m^2 para la irradiación de las fajitas de pollo. El tiempo de exposición fue de 2 min (120 s) por lado.

En la Figura 11 se muestra la zona en la que se colocaron las fajitas de pollo para el tratamiento de irradiación de luz UV-C. Las muestras se situaron en los puntos centrales ya mencionados, sin envase y colocadas en cajas Petri en la rejilla superior, dentro de la cámara de luz ultravioleta.



Figura 11. Cámara de luz ultravioleta y posición de las muestras.

3.1.2. Acondicionamiento de la cámara de refrigeración

En la Figura 12 se presenta el comportamiento de la temperatura, punto de rocío y humedad relativa que registró el termohigrómetro. El control de la temperatura se realizó días antes de la colocación de las muestras en la cámara, y se obtuvo un promedio de 2 °C y una humedad relativa del 65 al 70 %. Estas condiciones se lograron mediante la regulación del termostato del refrigerador y de la colocación de la rejilla a diferentes distancias del ventilador del equipo. Se llevó un control continuo durante todo el almacenamiento de las muestras para asegurar que el producto se encontrara en óptimas condiciones.

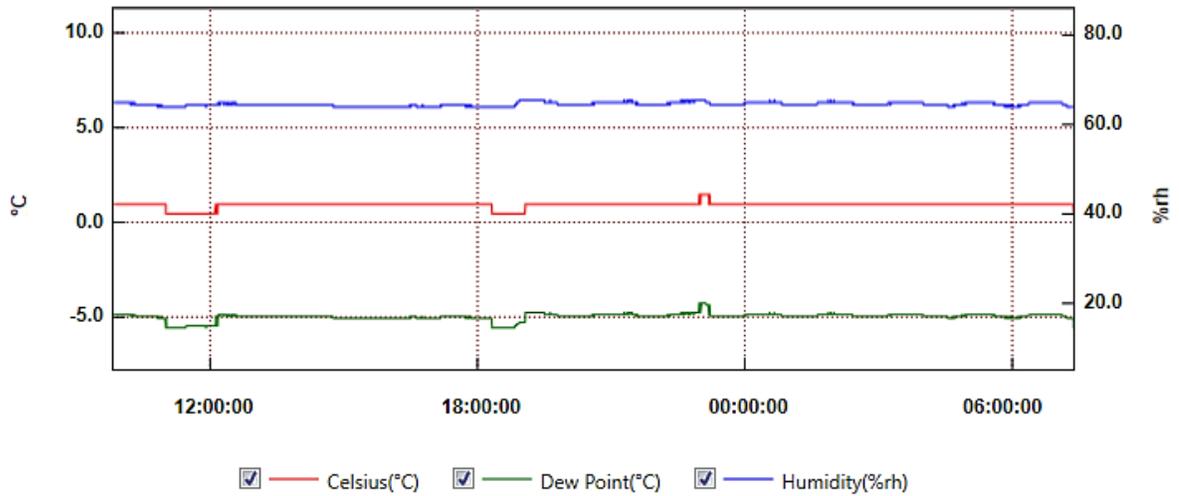


Figura 12. Gráfica de temperatura y humedad relativa registrados por el termohigrómetro.

3.1.3. Determinación del rendimiento másico del producto

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos del rendimiento másico del total de filetes de pollo obtenidas de una pechuga de pollo, con la finalidad de la determinación del porcentaje que se utilizó para el corte de las fajitas de pollo.

Tabla 5. Rendimiento másico de fajitas de pollo.

Pechuga de pollo	Peso total (g)	Peso de piel y hueso (g)	Peso total de filetes de pollo (g)	Rendimiento (%)
1	920.5	371.6	548.9	59.63
2	1050	448.88	601.1	57.24
3	1030.5	420.68	609.82	59.17
4	998.4	410.1	588.3	58.92
Promedio	999.85	412.81	587.03	58.74
Desviación estándar	57.017	31.982	26.912	1.042

Se establecieron como referencia 4 pechugas de pollo distintas, de aproximadamente 1 kg, y el rendimiento másico promedio fue del 58.74 %, lo que resulta aceptable debido al peso que representan el hueso y la piel del pollo, aunque se puede considerar como negativo la acumulación de un alto porcentaje de mermas. Es importante mencionar que, según Rodríguez (2011), la pechuga de pollo representa sólo un 22.7 % de proporción respecto a cada tejido en el ave.

3.2. Resultados experimentales de los parámetros de calidad físicos, fisicoquímicos y texturales

3.2.1. Evaluación del color

El color es uno de los primeros parámetros de calidad físicos de los alimentos que son evaluados por el consumidor, forma parte de su apariencia y en ocasiones es suficiente para la aceptabilidad o rechazo de un producto. Específicamente en la pechuga de pollo, la luminosidad, el ángulo de tono ($^{\circ}$ Hue) y la cromaticidad se vieron influenciados por diversos factores como los tratamientos y las condiciones a las que fue sometido el producto.

Según Cori et al. (2014), las diferencias encontradas en el color de la carne de pollo se deben a diferencias de manejo, dieta y genética de las aves, además de las características del colorímetro empleado. No obstante, las principales diferencias en esta propiedad física, se deben a la aplicación de los tratamientos en las fajitas de pollo, como la irradiación de luz UV-C, el procesamiento ultrasónico durante el marinado y la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero.

3.2.1.1. Luminosidad

La Figura 13 muestra que existió diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) entre los tratamientos a lo largo del almacenamiento a 2°C de fajitas de pollo envasadas a vacío. La luminosidad en las muestras control (C) tendió a disminuir conforme los días de almacenamiento, sin diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) a partir del día 3.

Las fajitas control presentaron una pérdida del 11 % de la luminosidad con respecto a la condición inicial. Resaltándose que el marinado compuesto de vinagre de manzana y sal tiene un efecto sobre el comportamiento de la luminosidad, ya que las fajitas marinadas (M) tuvieron menor pérdida de este parámetro durante el almacenamiento, con un 8.69 % de pérdida. Además se observa en la Figura 13 que las fajitas marinadas y sometidas a desinfección con radiación ultravioleta (lote UV-C) mostraron una mayor estabilidad en este parámetro, con una pérdida de sólo 4.25 % con respecto a la condición inicial.

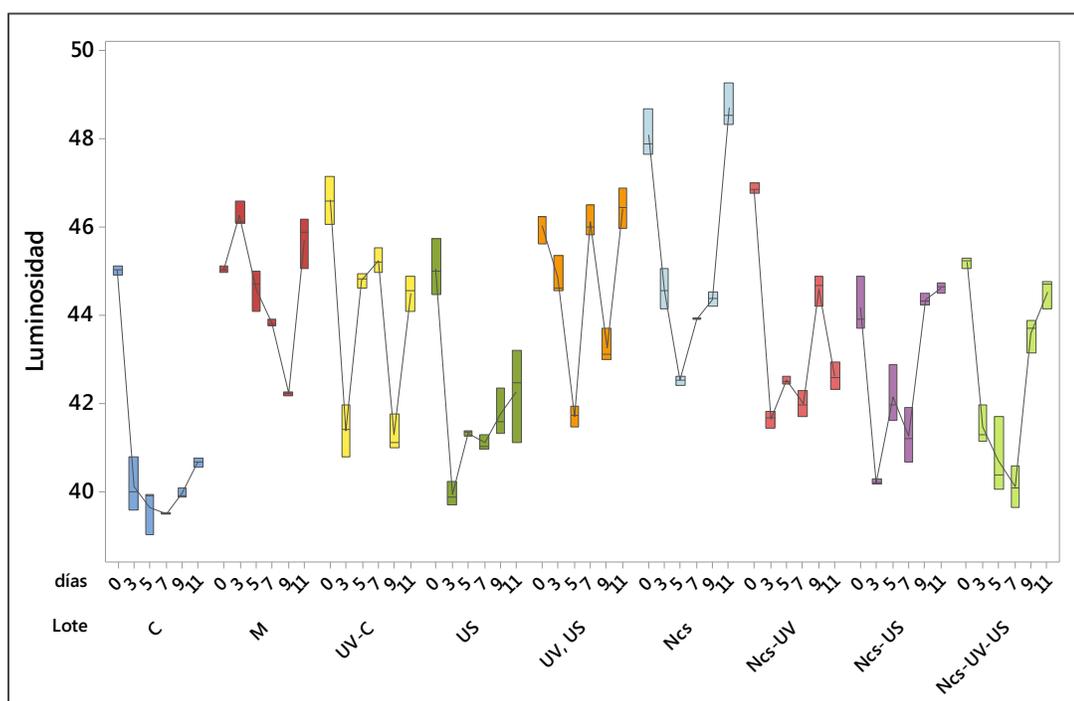


Figura 13. Cambios de luminosidad por efecto de los tratamientos aplicados en la conservación de fajitas de pollo a 2°C.

El lote de fajitas marinadas y sometidas a ultrasonido (US) presentó una disminución en la luminosidad hasta el tercer día de almacenamiento a 2 °C, lo que implicó una pérdida del 7 %, se considera que este comportamiento de oscurecimiento en las fajitas de pollo es resultado de la infiltración del marinado en los poros del alimento gracias al procesamiento con ultrasonido. No obstante a partir del día 5 no existió diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) en este parámetro de color.

La luminosidad resultante de las fajitas irradiadas con luz UV-C y sonicadas (UV/US) mostró mayor estabilidad, sin diferencias estadísticamente significativas. La combinación de estos tratamientos generó que el parámetro de color L^* se mantuviera homogéneo durante la conservación del producto. Además la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero al marinado generó un efecto en la luminosidad de la superficie de las fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C debido a la modificación del pH del producto. Pues los menores valores de pH se obtuvieron en los lotes cuyo marinado incluía nanocápsulas de aceite esencial de romero (Ncs, Ncs/UV, Ncs/US y Ncs/UV/US).

Con respecto al lote de fajitas marinadas con vinagre, sal y nanocápsulas de aceite esencial de romero (Ncs), los valores de luminosidad resultaron los más altos a comparación de las demás muestras, Figura 13. Se obtuvo una disminución durante los días de almacenamiento de las fajitas de pollo, no obstante el valor aumentó y resultó similar al valor inicial. Por su parte, el lote de fajitas sometidas a marinado con nanocápsulas e irradiadas con luz UV-C (Ncs/UV) presentó una disminución de la luminosidad al día 3 de almacenamiento en un 8.5 % con respecto al valor inicial, y se estabilizó sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en los posteriores días de conservación.

La luminosidad de las fajitas de pollo marinadas con nanocápsulas de aceite esencial de romero y además sometidas a ultrasonido (Ncs/US) tendió a mantenerse en valores cercanos a la pechuga en estado fresco, similar al día cero del control. Y el lote de fajitas marinadas con nanocápsulas, sonicadas e irradiadas con UV-C (Ncs/UV/US) no presentó diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) entre el día cero y el día 11 de almacenamiento. No obstante, existió una disminución en el resto del almacenamiento.

Las diferencias en el color de la superficie de las fajitas de pollo se asocian a la presencia y la penetración del vinagre de manzana, lo que se produce por efecto de la modificación de pH en el producto. Fletcher et al. (2000), midieron las variaciones de color de la superficie de carne de pechuga de pollo en cinco plantas comerciales de procesamiento de pollos de engorde. Se encontró que el color de este alimento tiene una alteración considerable en los valores de luminosidad, que van desde muy pálido a muy oscuro. Este comportamiento es resultado de la estructura irregular de la carne de pollo aunada a la conformación de las fibras y grasa en la pechuga de pollo que presentan diferencias en el color.

El marinado utilizado para las fajitas de pollo tiene vinagre de manzana, líquido de pH bajo. De acuerdo con Fletcher et al. (2000), se tiene una fuerte correlación negativa entre la luminosidad y el pH muscular. Esto explica el comportamiento en aumento de L^* cuando se marinó la carne, pues inmediatamente después de este proceso el pH disminuyó considerablemente en la pechuga de pollo. Es importante mencionar que las fajitas de pollo control (C) tuvieron una tendencia decreciente de la luminosidad, debido a los cambios fisicoquímicos en la pechuga de pollo causados por el deterioro de la misma provocando un oscurecimiento en la superficie del producto. Al marinar las fajitas de pollo, la luminosidad aumenta y se mantiene durante la conservación del alimento debido a la estabilización de la acidez superficial ocasionado por la incorporación del vinagre.

Un estudio realizado por Park y Ha (2015), determinó que el valor de la luminosidad en pechuga de pollo irradiada disminuyó gradualmente cuando se utilizó una dosis de 0.06 a 3.6 W/cm². Sin embargo, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos de 0.06-0.6 y de 1.2-2.4 W/cm². Se encontró que las pechugas de pollo irradiadas con las dosis altas de UV-C fueron ligeramente más oscuras que aquellas que fueron irradiadas con dosis bajas de UV-C y que las pechugas sin irradiar. La aplicación de UV-C en dosis altas afecta el color de la superficie de la carne de pollo debido al oscurecimiento del tejido producido por la oxidación lipídica. La Figura 13 muestra que las fajitas irradiadas con luz UV-C, lote (UV-C), no presentaron diferencias significativas en la luminosidad inicial y en el valor resultante después del almacenamiento, lo cual indica que la dosis de radiación que se estableció mantuvo este parámetro sensorial.

El tratamiento de ultrasonido (US) implicó una pérdida en la luminosidad de la superficie de las fajitas de pollo, efecto similar se observó por Chemat et al. (2011), quienes consideran que la aplicación del ultrasonido tiene una relación directa en los cambios de L^* debido a la penetración del color proveniente del marinado y de sus ingredientes. El vinagre de manzana presenta un color oscuro, parecido al café, razón por la cual el ultrasonido favoreció la infiltración a las fajitas disminuyendo su luminosidad. El ultrasonido es un método que incrementa la eficiencia del marinado y modifica la textura de la carne y, en este caso, debido al tejido del alimento, el tratamiento generó una disminución de L^* en las fajitas de pollo envasadas a vacío durante su almacenamiento a 2 °C.

3.2.1.2. Cromaticidad

La Figura 14 presenta el comportamiento de la cromaticidad de las fajitas de pollo sometidas a diferentes tratamientos. El lote control (C) presentó una cromaticidad en aumento correspondiente al tiempo en almacenamiento. Este comportamiento se debe a que en la superficie de las fajitas de pollo sin tratamiento, la intensidad del color aumenta debido al oscurecimiento de la carne causada por el deterioro de la misma, proveniente de las reacciones enzimáticas y microbiológicas. Este alimento se envasó al vacío y se refrigeró a 2 °C sin otro tratamiento, por esta razón la saturación del color aumentó.

Por su parte, de manera general la cromaticidad resultante en los lotes de fajitas de pollo sometidas a diferentes tratamientos tendió a disminuir hasta el tercer día de almacenamiento y después se mantuvo estable, lo que implicó tener un croma sin diferencia estadísticamente significativa para el resto del almacenamiento. Los tratamientos aplicados en la superficie de las fajitas de pollo tienen un efecto en la intensidad del color, disminuyendo su valor hasta su estabilidad.

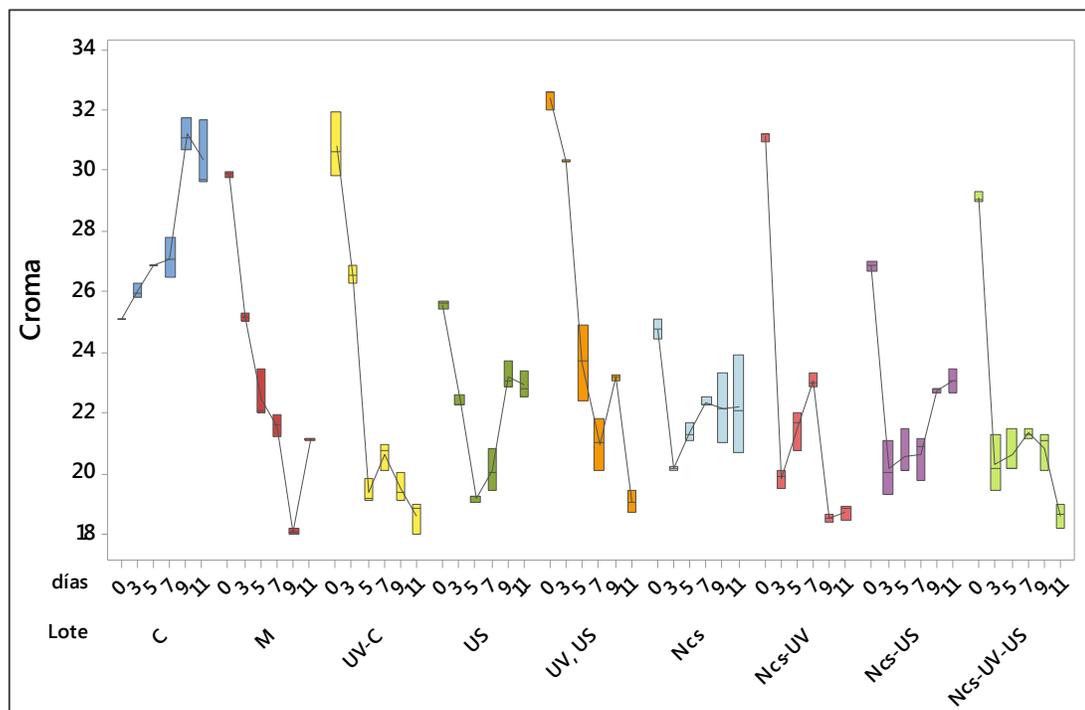


Figura 14. Cambios en la saturación del color (croma) de fajitas de pollo a diferentes tratamientos.

En la Figura 14 se observa que la cromaticidad resultante del lote de fajitas de pollo marinadas con vinagre de manzana y sal (M) disminuyó hasta tener un 16.6 % de pérdida durante el transcurso del almacenamiento de producto, aunque después del día 5 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$). Resaltándose que en el lote de fajitas irradiadas (UV-C), la pérdida del croma fue mayor con un porcentaje del 37 %, a pesar de ello, después del 5to día también se estabilizó su valor. A su vez; el lote (US), fajitas de pollo sometidas a ultrasonido durante el proceso de marinado, presentó menor porcentaje de pérdida de cromaticidad del 16 % hasta el tercer día de almacenamiento, y posteriormente no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$).

La irradiación de luz UV-C desempeña un papel crítico en la decoloración de la carne de pollo, ya que favorece la formación de compuestos que aceleran la tasa de decoloración del producto. Esto depende de la intensidad y distribución de luz utilizada para la irradiación, en combinación con la permeabilidad a la luz del material de envasado. De acuerdo a los resultados obtenidos; la cromaticidad del lote (UV/US), fajitas sometidas a ultrasonido e irradiadas con UV-C, presentó una pérdida mayor a comparación del lote (US), pues ésta fue del 25 % y desde el día 5 de almacenamiento se mantuvo estable y sin diferencias significativas.

Según Renner (1990), la pechuga de pollo irradiada con UV-C puede mostrar decoloración en altas dosis, ya que favorece la formación de metamioglobina. La rancidez oxidativa es considerada como el factor más importante no microbiano responsable del deterioro de la carne, resultando en una pérdida de calidad de los alimentos. Por otro lado, Chun et al. (2010) estudiaron la efectividad de la irradiación UV-C en la calidad sensorial de pechugas de pollo durante su almacenamiento, y encontraron que este método es útil para mejorar la seguridad microbiológica sin modificar la calidad del color del alimento.

Por otro lado, la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero en el marinado, causó un efecto positivo en la cromaticidad de las fajitas de pollo. En el lote de fajitas con nanocápsulas (Ncs), el croma presentó una disminución mínima del 16 % en los primeros 3 días y se estabilizó durante el resto del almacenamiento, lo que implicó un croma estable sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$).

El aceite esencial de romero ayudó a mantener la intensidad del color de la pechuga de pollo, aunque en combinación con la radiación UV-C generó una pérdida considerable. El lote de Ncs/UV tuvo una pérdida del 35.5 % al día 3 de almacenamiento, que después se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas. No obstante, se obtuvo una menor pérdida de cromaticidad en el lote de Ncs/US con el 18.5 % al tercer día de almacenamiento a 2 °C. Es decir, el ultrasonido no genera un efecto radical en la cromaticidad. Resaltando que la irradiación UV-C generó mayor pérdida de la cromaticidad en las fajitas de pollo. En el lote de fajitas sometidas a ultrasonido con nanocápsulas e irradiadas con luz UV-C, (Ncs/UV/US), se obtuvo un 31 % de pérdida del croma al día 3. Aunque, se estabilizó sin diferencias estadísticamente significativas en los días posteriores.

Un estudio realizado por Yusop et al. (2011), donde se evaluó el efecto de la incorporación de nanopartículas de aceite esencial de paprika en el marinado de carne de pollo, demostró que al utilizar una concentración baja de nanopartículas se produce una penetración del color más alejada, mientras que una mayor concentración de las nanopartículas genera un mayor color de la superficie CIE (rojo y amarillo) y en ningún caso se desarrolla un efecto negativo en la aceptabilidad del producto.

Se determinó que la incorporación de ingredientes funcionales en las nanocápsulas, como antimicrobianos y antioxidantes, beneficiarían al marinado de carne de pollo añadiendo valor al producto. Al igual que Yusop et al. (2011), la incorporación de nanocápsulas cargadas con aceite esencial de romero en el líquido utilizado para el marinado de fajitas de pechuga de pollo, se observa que produce una mayor penetración del color para los tratamientos evaluados. Incrementó la calidad del color de carne de pollo marinada, debido a que la superficie de esta aumentó en los valores de a^* y b^* .

3.2.1.3. Ángulo de tonalidad (°Hue)

En ángulo de tono o °Hue representa el matiz o escala de la tonalidad de color. Se le llama ángulo de color debido a que las mediciones se realizan en grados. El círculo de color representa 360°, donde el 0° es el color rojo, 90° es amarillo, 180° es verde y 270° es el color azul. En la Figura 15 se ubica la tonalidad promedio en las fajitas de pollo.

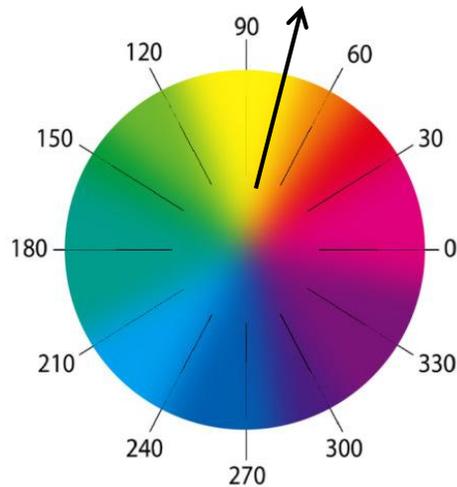


Figura 15. Escala de ángulo de color o Hue (Konica Minolta, s/a).

La Figura 16 muestra el comportamiento del ángulo Hue en la superficie de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C. En el lote control (C), el ángulo de tonalidad resultante tuvo una pérdida del 4.5 %, sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) desde el día 5 hasta el último día de almacenamiento. Es decir, el color de la superficie de las fajitas de pechuga de pollo sin tratamiento se mantuvo casi constante durante su conservación. Y éste se encuentra en el color amarillo del círculo de tonalidad. En cuanto al lote de fajitas marinadas (M), en el día cero tuvo un ángulo de tonalidad igual que el lote control; no obstante, éste aumentó durante el transcurso de los días de almacenamiento y se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) desde el día 5.

Con respecto al lote de fajitas marinadas e irradiadas (UV-C), el ángulo Hue aumentó durante el tiempo de almacenamiento del producto en refrigeración a 2 °C, sin presentar un comportamiento cinético. Se considera que la irradiación UV-C en la superficie de fajitas de pollo tiene efecto en este parámetro, aunque en la escala de color, éstas aún se encuentran en el amarillo. En contraste con el lote de fajitas sonicadas (US), en el cuál se presentó un ángulo de tonalidad menor que en el lote UV-C. Las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido presentaron en su superficie un ángulo Hue sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante su almacenamiento a 2 °C. Resaltándose que el ángulo de tonalidad en el lote (UV/US) aumentó ligeramente durante el tiempo de conservación del alimento, ubicándose en el color amarillo en el círculo de color (ángulo Hue).

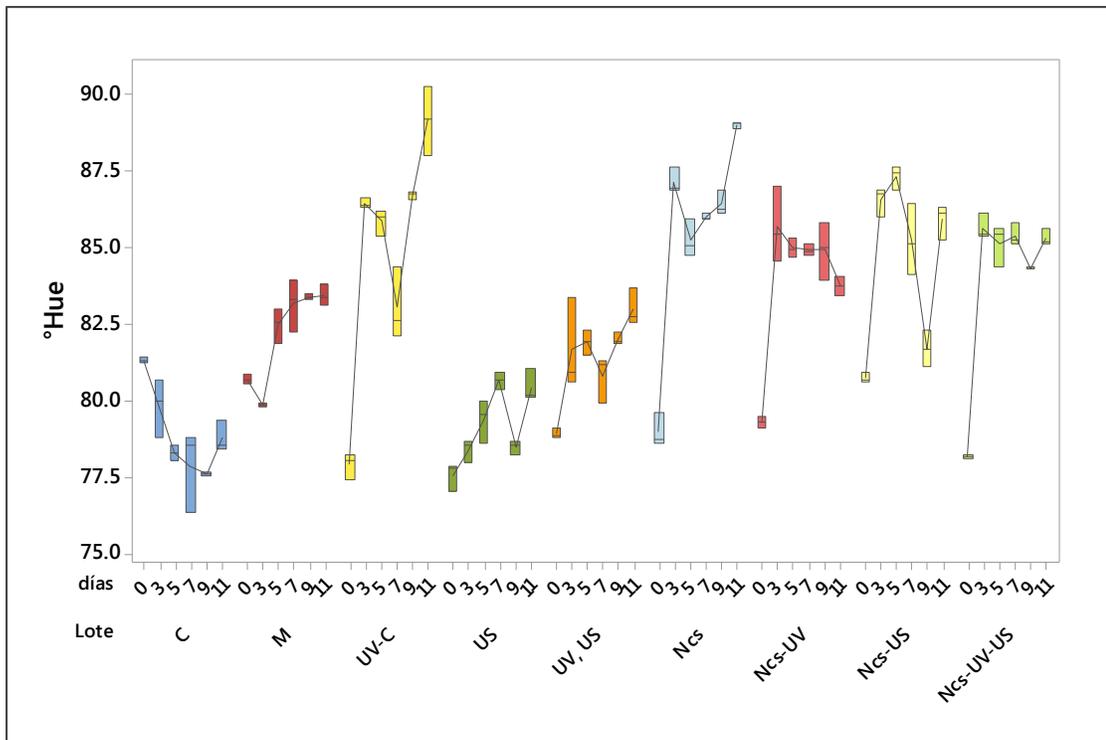


Figura 16. Cambios en el ángulo Hue de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.

Por lo que se refiere a los lotes de fajitas de pollo marinadas y adicionadas con nanocápsulas de aceite esencial de romero, el tiempo de almacenamiento tuvo un efecto en la alteración del ángulo Hue, pues éste aumentó durante la conservación del producto. En el lote (Ncs), este parámetro aumentó del día cero al día 3 de almacenamiento y después se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$). Así mismo, el ángulo de tonalidad resultante de los lotes Ncs/UV, Ncs/US y Ncs/UV/US presentó un comportamiento similar. El ángulo Hue de la superficie de las fajitas de pollo aumentó en un 6 % aproximadamente y se estabilizó en el tercer día de su conservación. Lo que implica un color sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) para el resto del almacenamiento, el cual se ubica en la escala del color dentro del amarillo.

Las pechugas de pollo en estado crudo y fresco, para la USDA (2008), tienen un color que puede variar de blanco a amarillo, estos colores son normales y se consideran aceptables para el consumidor. Considerando que el ángulo Hue de las fajitas se presentó amarillo en la escala de color, se determina que estas tienen un color aceptable.

En cuanto al color de la superficie de las fajitas de pollo irradiadas con UV-C, se considera que se acentuó el amarillo, sin oscurecer el alimento ni presentar efectos negativos. Chun et al. (2010), encontraron que la irradiación UV-C en pechugas de pollo no tiene efectos significativos en los valores de L*, a* y b* en la escala CIELAB. Y que además, la carne de pollo irradiada de UV-C aumenta en su seguridad microbiana durante el almacenamiento, sin modificar su calidad sensorial.

El color de la carne de ave es un atributo crítico que puede afectar la decisión de compra de los consumidores. Según Fletcher et al. (2000), un pH alto de la pechuga de pollo se asocia con un color más oscuro. Con respecto al procesamiento ultrasónico, en vista de que éste aumenta la eficiencia del marinado, las fajitas de pollo sonicadas pueden presentar un aumento en la penetración de color debido a la infiltración de sustancias por los poros de la carne de pollo.

3.2.2. Evaluación de la pérdida de peso

La pérdida de peso de los alimentos en el almacenamiento frigorífico es común debido a la humedad relativa y las altas velocidades de circulación de aire, lo cual genera una evaporación del agua presente y desecación del producto. Sin embargo, en este caso las bolsas donde se envasaron las fajitas de pollo son de polietileno de alta densidad, un material que genera barreras al vapor de agua y reduce la liberación del mismo al ambiente.

Es por esta razón que se considera que el fenómeno principal causante de la pérdida de peso de las fajitas de pollo envasadas a vacío y almacenadas a 2 °C, fue la difusión de los ingredientes del marinado al alimento. El líquido de marinado contenía sal y vinagre de manzana, con o sin nanocápsulas de aceite esencial de romero, y estos ingredientes penetraron por difusión a través de los poros del alimento con una distribución irregular al paso del tiempo. Principalmente, la sal provocó una reducción en la actividad del agua de las fajitas de pollo liberando líquido drenado durante el tiempo de almacenamiento y por consiguiente, ocasionando la pérdida de peso.

3.2.2.1. Pérdida de peso durante el almacenamiento

Los resultados de pérdida de peso de fajitas de pechuga de pollo durante su almacenamiento en refrigeración a 2 °C se resumieron en la Tabla 6. El color verde representa los valores menores en este parámetro y el rojo los mayores porcentajes de pérdida de peso. Los lotes de fajitas de pollo marinadas (M), tratadas con ultrasonido (US), marinadas con nanocápsulas de aceite esencial de romero e irradiadas con luz UV-C (Ncs/UV) y fajitas marinadas con nanocápsulas y tratadas con ultrasonido (Ncs/US), fueron en los que el alimento presentó menores pérdidas de peso.

Tabla 6. Porcentaje de pérdida de peso de fajitas de pollo en refrigeración.

<i>Lote</i>	<i>Días de almacenamiento a 2 °C</i>					
	0	3	5	7	9	11
Control (C)	0 ± 0.0	2.39 ± 0.17	5.62 ± 0.41	6.28 ± 0.12	6.30 ± 0.54	7.5 ± 0.09
Marinado (M) (vinagre y sal)	0 ± 0.0	4.62 ± 0.4	4.64 ± 0.2	4.20 ± 0.15	3.8 ± 0.30	4.00 ± 0.7
UV-C (180 J/sm²)	0 ± 0.0	1.70 ± 0.18	2.47 ± 0.46	5.41 ± 0.22	5.7 ± 0.1	5.85 ± 0.6
Ultrasonido (US) (amplitud 80)	0 ± 0.0	3.14 ± 0.5	3.50 ± 0.6	3.61 ± 0.31	3.33 ± 0.16	3.99 ± 0.60
UV/US	0 ± 0.0	1.43 ± 0.8	2.7 ± 0.1	3.11 ± 0.44	5.92 ± 0.09	6.25 ± 0.5
Nanocápsulas (Ncs)(300 mg)	0 ± 0.0	2.9 ± 0.06	4.20 ± 0.3	6.1 ± 0.14	5.43 ± 0.04	7.48 ± 0.01
Ncs/UV	0 ± 0.0	4.42 ± 0.5	4.8 ± 0.6	5.08 ± 0.6	3.55 ± 0.4	4.32 ± 0.7
Ncs/US	0 ± 0.0	3.09 ± 0.8	4.3 ± 0.17	5 ± 0.45	5.16 ± 0.9	4.88 ± 0.3
Ncs/UV/US	0 ± 0.0	5.16 ± 0.07	6 ± 0.78	5.88 ± 0.01	6.57 ± 0.07	6.92 ± 0.06

La pérdida de peso en las fajitas de pollo del lote control (C) en los primeros días de almacenamiento fue mínima y éste valor incrementó al transcurso del tiempo. Sin embargo, las fajitas de los demás lotes presentaron una pérdida de peso importante al inicio debido al proceso de marinado y a la difusión de la sal a través del alimento.

El lote control (C) presentó el mayor porcentaje de pérdida de peso al final del almacenamiento debido a que las fajitas de pollo no fueron sometidas a algún tratamiento y esto tuvo un efecto importante en la pérdida de agua del producto. Por el contrario, el lote de fajitas marinadas (M) y el lote de fajitas marinadas sometidas a ultrasonido (US) presentaron los menores porcentajes de pérdida de peso al finalizar el tiempo de almacenamiento. Y cabe resaltar que la pérdida de peso inicial fue relevante causado por el marinado y después no se presentaron diferencias estadísticamente significativas.

El marinado de vinagre de manzana y sal redujo la pérdida de peso durante el almacenamiento porque la sal ocupó el lugar del agua en el proceso de marinado, donde ocurre la mayor pérdida de peso de las fajitas de pollo. Además, en el almacenamiento del producto, la pérdida de agua es mínima debido a que la sal aumenta la capacidad de retención de agua en las fajitas de pollo. Más aún, esto se acentúa cuando se somete a las fajitas de pollo al proceso de ultrasonido durante el marinado porque éste aumenta la transferencia de masa y la eficiencia del proceso. Por esta razón, el lote de fajitas tratadas con ultrasonido (US) tuvo las menores pérdidas de peso durante el almacenamiento a 2 °C.

También se encontraron mínimas pérdidas de peso en los lotes de Ncs/UV y Ncs/US, lo que se debe a la cantidad de humedad con la que inició el producto. La combinación de las nanopartículas con la irradiación o incluso con el ultrasonido generó menores pérdidas de peso del producto, que finalmente se establecieron como algunas de las más bajas de los tratamientos. No obstante, el lote de fajitas con nanocápsulas de aceite esencial de romero (Ncs) se vio afectado por la difusión de los ingredientes al alimento hasta llegar a un 7.5 % de pérdida de peso al final del almacenamiento.

3.2.2.2. Pérdida de peso por cocción

La cocción de las fajitas de pollo se realizó a 75 °C durante 8 minutos. La Tabla 7 muestra los porcentajes de pérdida de peso por cocción resultantes de las fajitas de pollo de cada lote. En verde se resaltan los menores valores obtenidos y en rojo las mayores pérdidas de peso por cocción de las fajitas de pechuga de pollo.

Tabla 7. Porcentaje de pérdida de peso por cocción de fajitas de pollo.

<i>Lote</i>	<i>Días de almacenamiento a 2 °C</i>					
	0	3	5	7	9	11
Control (C)	29.7 ± 0.01	26.9 ± 0.2	19.3 ± 0.09	21.9 ± 0.04	29.2 ± 0.09	25 ± 0.08
Marinado (M) (vinagre y sal)	10.2 ± 0.02	15.7 ± 0.02	13.3 ± 0.07	17.4 ± 0.04	20 ± 0.01	24 ± 0.03
UV-C (180 J/sm²)	5.6 ± 0.03	6.9 ± 0.07	7.5 ± 0.04	10.2 ± 0.07	15.8 ± 0.07	13.8 ± 0.06
Ultrasonido (US) (amplitud 80)	3.9 ± 0.07	5.2 ± 0.01	7.2 ± 0.07	7.8 ± 0.08	9.4 ± 0.04	16.5 ± 0.05
UV/US	3.3 ± 0.02	7.5 ± 0.09	10.1 ± 0.04	11.6 ± 0.04	11.6 ± 0.1	17.1 ± 0.02
Nanocápsulas (Ncs)(300 mg)	11.1 ± 0.07	18.3 ± 0.04	19 ± 0.02	20.3 ± 0.05	20 ± 0.1	21.5 ± 0.1
Ncs/UV	13.8 ± 0.05	23 ± 0.08	23.7 ± 0.1	21.5 ± 0.1	23 ± 0.4	23.6 ± 0.4
Ncs/US	13.6 ± 0.07	15.2 ± 0.3	19.6 ± 0.08	21.2 ± 0.4	20 ± 0.1	25.6 ± 0.3
Ncs/UV/US	13 ± 0.06	18.0 ± 0.6	20.01 ± 0.5	21.2 ± 0.03	24.5 ± 0.07	28.6 ± 0.5

En el lote de fajitas de pollo control se presentó un alto porcentaje de pérdida de peso por cocción, sobre todo en el estado fresco y en el día 3 de almacenamiento. Después este parámetro se redujo desde el día 5 de almacenamiento debido a que las fajitas de pollo perdieron humedad durante su conservación a 2 °C. En el lote de fajitas marinadas (M), la pérdida de peso por cocción aumentó conforme los días de almacenamiento. Este comportamiento se debe a que la sal y el vinagre reducen la pérdida de peso por cocción en los primeros días de conservación debido a la obstrucción de los poros de la carne, no obstante, al transcurrir los 10 días de almacenamiento las fajitas de pollo pierden un alto porcentaje de peso.

Los porcentajes de pérdida de peso por cocción en el lote de fajitas irradiadas (UV-C) resultaron ser los menores debido al tratamiento de irradiación de luz UV-C en la pechuga de pollo. Este comportamiento es similar a estudios recientes realizados por Olivera y Cárdenas (2013), los cuales sugieren mejoras en la velocidad de pérdida de agua, en la textura de la carne tanto fresca como cocida y un mayor rendimiento en la cocción cuando se irradia con UV-C pechuga de pollo.

De la misma manera, el lote de fajitas sonicadas (US) redujo la pérdida de peso por cocción. Según Chemat et al. (2011), el ultrasonido aplicado a productos cárnicos, antes de la cocción acelera el tiempo de cocimiento, mejora la retención de humedad y la eficiencia energética, además de que mejora los atributos texturales de la carne cocida. Un estudio realizado por Alarcon-Rojo et al. (2015), mostró que la carne de pechuga de pollo tratada por ultrasonido y almacenada a 4°C durante siete días redujo la fuerza de corte de las muestras sin tener efecto en las pérdidas por cocción. La menor pérdida por cocción es lo que se considera ideal, debido a que el rendimiento de la misma disminuye cuando el porcentaje de pérdida es alto.

Así mismo; los procesos o tecnologías combinadas, ultrasonido e irradiación UV-C en fajitas de pollo, resultó positiva porque se redujo la pérdida de peso por cocción del alimento en el lote UV/US. Por su parte, la incorporación de las nanopartículas de aceite esencial de romero no mostró un efecto positivo en la cocción de las fajitas de pollo, pues el porcentaje de pérdida de peso en estos lotes fue alto. Se considera que la alta temperatura de cocción favorece la liberación de la humedad de fajitas con nanocápsulas.

3.2.3. Determinación del líquido drenado

Las carnes y aves que se transportan desde la matanza se mantienen a bajas temperaturas en las plantas procesadoras y los camiones refrigerados. A esta temperatura, el producto libera una parte de humedad gradualmente. La producción de este jugo visible de carnes y aves se conoce como goteo o depuración. Este proceso ocurre mientras los cortes son presentados para la venta al por menor, durante el envío de carne para ventas al por mayor y durante el almacenamiento de los cortes. En los refrigeradores convencionales ajustados a 4 °C o menos, aún más líquido se drenará del producto. Mientras más tiempo permanece en el refrigerador, más líquido se liberará de las células de los músculos (USDA, 2007).

La Tabla 8 muestra el porcentaje de líquido drenado promedio resultante de las fajitas de pollo envasadas a vacío. El líquido drenado de la pechuga de pollo tendió a aumentar durante los días de almacenamiento en refrigeración a 2 °C.

Tabla 8. Porcentaje de líquido drenado de fajitas de pollo.

<i>Lote</i>	<i>Días de almacenamiento a 2 °C</i>				
	3	5	7	9	11
Control (C)	2,86 ± 0.85	4,77 ± 0.09	5,49 ± 0.47	5,89 ± 0.02	8,16 ± 0.05
Marinado (M) (vinagre y sal)	4,10 ± 0.13	4,17 ± 0.01	3,83 ± 0.09	3,86 ± 0.1	3,88 ± 0.09
Ultrasonido (US) (amplitud 80)	3,28 ± 0.7	4,07 ± 0.03	3,32 ± 0.08	3,50 ± 0.06	3,94 ± 0.07
UV-C (180 J/sm²)	1,80 ± 0.15	2,31 ± 0.1	4,62 ± 0.05	4,69 ± 0.06	5,93 ± 0.02
UV/US	2,10 ± 0.78	3,25 ± 0.08	3,22 ± 0.07	5,45 ± 0.08	6,94 ± 0.1
Nanocápsulas (Ncs)(300 mg)	3,18 ± 0.21	5,33 ± 0.05	4,69 ± 0.34	3,81 ± 0.05	5,61 ± 0.07
Ncs/US	4,28 ± 0.04	4,67 ± 0.05	4,83 ± 0.06	3,95 ± 0.08	3,92 ± 0.02
Ncs/UV	4,30 ± 0.03	5,17 ± 0.05	3,49 ± 0.1	3,81 ± 0.02	4,12 ± 0.04
Ncs/UV/US	4,20 ± 0.05	5,75 ± 0.1	6,02 ± 0.07	6,10 ± 0.03	6,22 ± 0.02

El lote control (C) presentó el mayor porcentaje de líquido drenado en el día 11 de almacenamiento de las fajitas de pollo, con un promedio de 8.16 % a causa de la pérdida de firmeza en la carne lo cual genera una mayor liberación de agua del alimento al medio. Es por eso que las fajitas de pollo sin tratamientos, sólo envasadas a vacío y refrigeradas, presentaron liberaron más humedad conforme los días de almacenamiento.

Resaltándose que los menores valores de porcentaje de líquido drenado los tuvieron los lotes de fajitas marinadas (M), fajitas sometidas a ultrasonido durante el marinado (US), fajitas sometidas a ultrasonido en marinado con nanocápsulas de aceite esencial de romero (Ncs/US) y fajitas marinadas con nanocápsulas y sometidas a irradiación UV-C (Ncs/UV). En cuanto al lote M, las fajitas de pechuga de pollo se sometieron al marinado de vinagre con sal dando como consecuencia que la sal ocupe el lugar del agua en el alimento y se reduzca su actividad de agua. Por ello, en los días de almacenamiento el porcentaje de líquido drenado no tuvo diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$).

Mismo comportamiento se observa en las fajitas tratadas con ultrasonido, lote US, donde existieron algunas fluctuaciones en el líquido drenado del alimento durante su almacenamiento, pero teniendo de los menores porcentajes. Esto se debe a la firmeza de las fajitas de pollo, pues el ultrasonido le atribuye una modificación de textura en el alimento.

El líquido drenado de las fajitas de pollo irradiadas, lote UV-C, tuvo la tendencia de aumentar conforme los días de almacenamiento, esto se debe a que inicialmente la irradiación UV-C hace que el producto pierda humedad superficial, y por ello en el día 3 de almacenamiento tiene los menores valores de líquido drenado. Sin embargo, una vez que transcurren los días, se libera la humedad del producto debido a que la irradiación de UV-C elimina la carga microbiana inicial y provoca la muerte celular, haciendo que la humedad retenida por estos sistemas sea drenada. Comportamiento similar se observa en las fajitas irradiadas y sonicadas, el lote UV/US, con un porcentaje del 6.94 % en el día 11.

Zhuang et al. (2007), estudiaron las propiedades dieléctricas de la pechuga de pollo y determinaron que el promedio de líquido drenado es del 2.47 % después de las 24 h de maduración de la carne y que éste va en aumento en un 2 % aproximado cada 48 h, además encontraron que la pérdida de líquido de la carne de pollo es significativamente mayor en el pectoral mayor que en el pectoral menor del pollo.

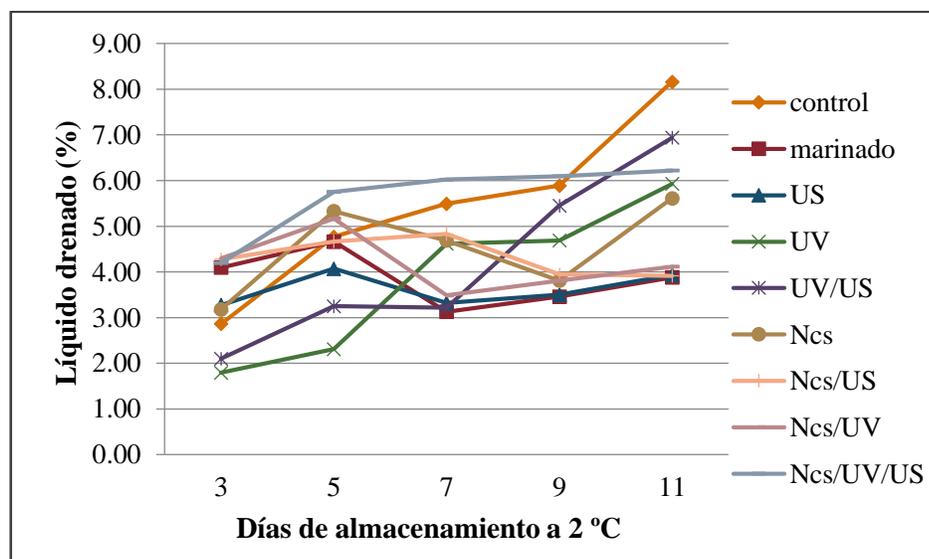


Figura 17. Porcentaje de líquido drenado de las fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.

La Figura 17 muestra el comportamiento del porcentaje de líquido drenado de los lotes de fajitas de pollo durante el tiempo de almacenamiento a 2 °C, con la finalidad de observar la tendencia que éste presenta. La aplicación de nanocápsulas de aceite esencial de romero y el tratamiento por ultrasonido, en los lotes Ncs/US y US, detuvo la liberación del líquido de las fajitas de pollo debido a que el ultrasonido le brindó firmeza a la carne y aumentó la retención de humedad.

En el caso del proceso del marinado, la incorporación de sal y vinagre de manzana son ingredientes que disminuyen el pH del producto y a su vez, favorecen la retención de humedad. Por su parte, la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero en el marinado y su procesamiento con ultrasonido; además, de la irradiación de luz UV-C en las fajitas de pollo (lote Ncs/UV/US) propició a que el líquido drenado aumentara hasta el día 5 de almacenamiento y después se estabilizó sin diferencias estadísticamente significativas durante el resto del almacenamiento.

3.2.4. Resistencia al corte

La firmeza o terneza de la carne es uno de los atributos más importantes considerados para la determinación de su calidad sensorial y que además tiene directa relación con otras propiedades fisicoquímicas (Lawrie, 1967). La prueba de resistencia al corte se realizó a las muestras de fajitas de pollo para el análisis de la firmeza de la carne y el efecto de los tratamientos aplicados. Esta prueba simula un corte a la fajita, la resistencia al corte se considera como la fuerza máxima requerida para romperla.

Los principales componentes de la carne que constituyen a su firmeza o dureza son el tejido conectivo, las fibras musculares y los lípidos asociados al tejido muscular (Grunert et al., 2003). Por esta razón, en general existen variaciones en la firmeza obtenida por la prueba de resistencia al corte. En algunos lotes la tendencia de este parámetro va en disminución y en otras va en aumento conforme los días de almacenamiento en refrigeración a 2 °C. En la Figura 16 se presenta la resistencia al corte resultante de las fajitas de pechuga de pollo conforme los días de almacenamiento de éstas.

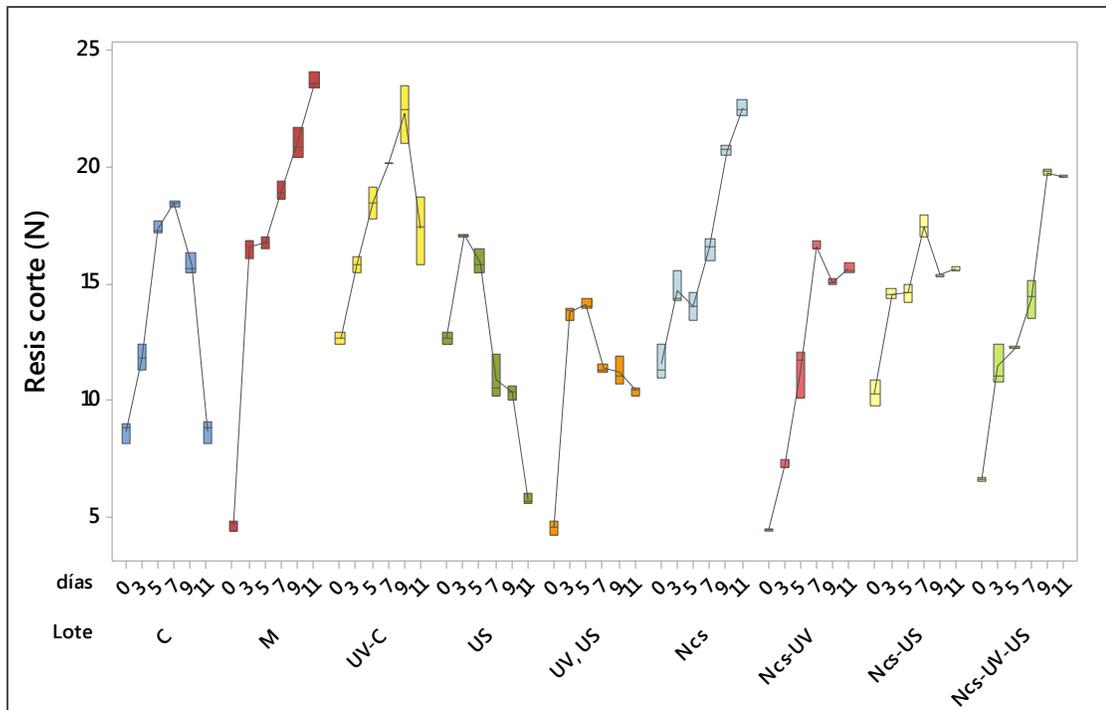


Figura 18. Cambios en la resistencia al corte de las fajitas de pollo almacenadas a 2 °C.

El lote control (C) presentó un aumento en su resistencia al corte del día 0 al día 7, que comenzó desde 8 N hasta los 18 N. Cabe mencionar que después de este tiempo, la fuerza de corte de las fajitas de pollo control disminuyó hasta llegar a un valor similar al estado fresco. La resistencia al corte de las fajitas de pollo marinadas con vinagre y sal, lote (M), comenzó siendo menor que las fajitas en estado fresco, pero tuvo una tendencia en aumento conforme los días de almacenamiento, es decir un comportamiento cinético positivo.

El marinado le brindó a la carne mayor firmeza, lo cual resultó distinto al estudio realizado por Yusop et al. (2011), donde determinaron que los marinados ácidos en la carne de pechuga de pollo involucran diversos factores funcionales, incluyendo el debilitamiento de las estructuras debido al hinchamiento de la carne causando la degradación de los tejidos, ablandando el alimento, haciéndola más jugosa. Se considera que los resultados obtenidos se diferenciaron debido a la composición del marinado, la cantidad de sal agregada y el tiempo de almacenamiento.

La resistencia al corte que presentaron las fajitas de pollo irradiadas con luz UV-C, lote UV-C, en el día cero resultó mayor a comparación de las fajitas de pollo frescas. Es decir, inicialmente el tratamiento de irradiación de luz UV-C en la pechuga de pollo propicia a que las fibras musculares de la carne se endurezcan debido a la contracción de las proteínas miofibrilares. La tendencia de la firmeza de las fajitas de pollo irradiadas con UV-C fue en aumento conforme los días de almacenamiento hasta el día 9, posteriormente disminuyó la resistencia al corte. Resaltándose que las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido durante el marinado, (US), presentaron una disminución de la resistencia al corte.

Las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido iniciaron con una firmeza mayor que las de estado fresco, pero se ablandaron desde el día 3 hasta el resto de su almacenamiento en refrigeración. El ultrasonido reduce la fuerza de corte de la carne, haciéndola más jugosa. Según Chemat et al. (2011), el ultrasonido de potencia ha demostrado que imparte efectos positivos en los parámetros de calidad texturales y sensoriales de pechuga de pollo. El ultrasonido actúa de dos maneras: rompiendo la integridad de las células musculares o incrementando las reacciones enzimáticas. El ablandamiento ultrasónico se ha evaluó y comprobó en la carne de pollo.

La calidad de la carne depende del aroma, sabor, apariencia, firmeza y jugosidad. El consumidor prefiere carne blanda y fácil de cortar, por lo que la resistencia al corte debe ser de un valor bajo. Alarcon-Rojo et al. (2015), en su investigación sobre el ultrasonido de potencia en el procesamiento de la carne, encontraron que las muestras tratadas con esta tecnología reducen su firmeza sin tener un efecto significativo en el tiempo de sonicación ni en las condiciones de almacenamiento en la pérdida de peso ni las características sensoriales de la carne de pollo.

La Figura 18 muestra que la resistencia al corte de las fajitas de pollo irradiadas con luz UV-C y tratadas con ultrasonido durante el marinado, lote UV/US, aumentó al día 3 de su almacenamiento y después se mantuvo estable, lo que indica que no existieron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en el resto del almacenamiento a 2 °C. La combinación del ultrasonido y de la irradiación UV-C en las fajitas de pollo propiciaron a que su textura se conservara. Con respecto a los lotes de fajitas de pollo incorporadas de nanocápsulas de aceite esencial de romero, se observó un aumento en la resistencia al corte del alimento.

La fuerza de corte de las fajitas de pollo de los lotes de nanocápsulas de aceite esencial de romero (Ncs), fajitas marinadas con nanocápsulas e irradiadas de UV-C (Ncs/UV), fajitas marinadas con nanocápsulas y tratadas con ultrasonido (Ncs/US) y las fajitas marinadas con nanocápsulas, tratadas con ultrasonido e irradiadas de luz UV-C (Ncs/UV/US), presentó un aumento conforme los días de almacenamiento debido al mismo efecto del marinado, los ingredientes de éste favorecen el endurecimiento de las fibras de la carne. No obstante se estabilizó el valor al día 7 de almacenamiento.

Cabe mencionar que los resultados experimentales tienen diversas irregularidades porque la carne de pollo está compuesta de los tejidos de soporte y la cantidad de este tipo de tejidos varía según su localización y entre las especies. El agotamiento *post mortem* de las reservas de energía en el músculo inicia la aparición del rigor y la demarcación entre músculo y carne (Lyon y Buhr, 1999). El mayor valor de firmeza obtenida por la prueba de resistencia al corte fue en aquellas fajitas de pollo del lote Ncs, con un valor máximo de 23 N de fuerza de corte al día 11 de almacenamiento. La combinación de las tecnologías de ultrasonido, irradiación UV-C y nanocápsulas correspondiente al lote Ncs/UV/US, resultó negativa porque la carne de pollo se endureció debido a la pérdida de agua.

3.2.5. Prueba de punción

La prueba de punción consiste en atravesar la fajita de pollo con una geometría que permite que rompa las estructuras de la carne y una vez que la atraviesa, la levanta. La firmeza puede ser medida como la fuerza requerida para deformar o penetrar un producto, el método de deformación permite registrar la curva de tiempo-fuerza conocida como perfil de firmeza (Watanabe y Devine, 1996). En este método se evalúa la firmeza pero ésta es diferente a la de la resistencia al corte debido a que evalúa la fuerza de penetración.

La Figura 19 muestra los resultados de la firmeza obtenida en esta prueba y cabe mencionar que se muestran diferencias significativas entre cada tratamiento y los días de almacenamiento a 2 °C de las fajitas de pollo. El tiempo en refrigeración y la aplicación de distintos métodos de conservación en el pollo tienen un efecto directo en la firmeza de la carne.

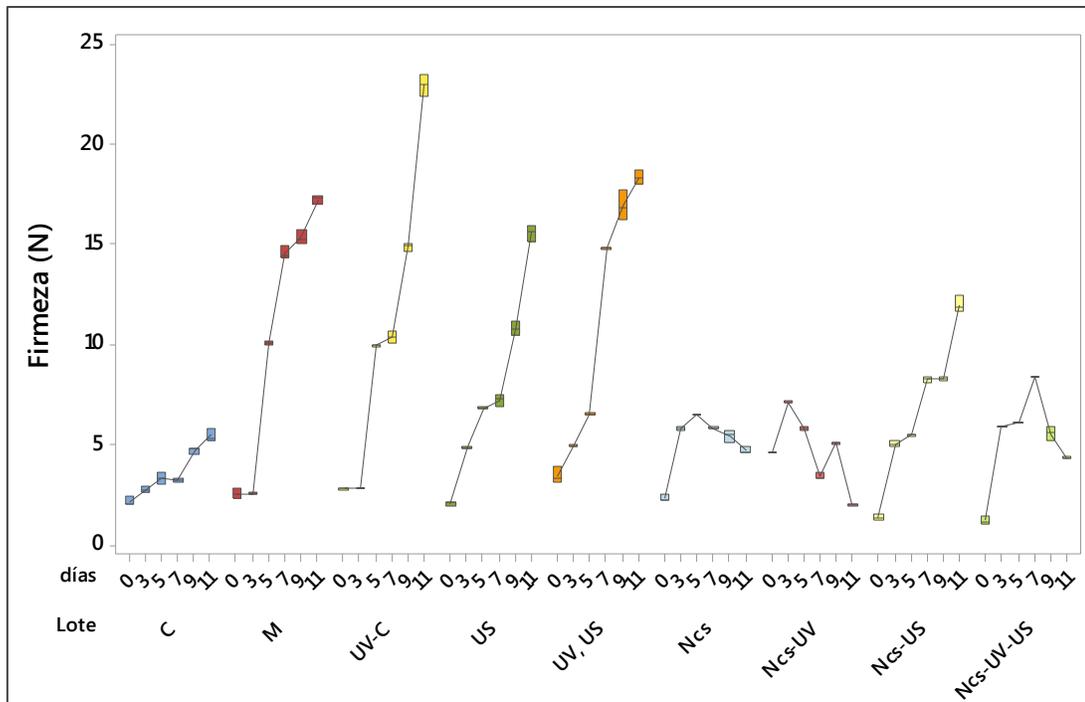


Figura 19. Cambios en la firmeza de las fajitas de pollo evaluada en la prueba de punción.

En el lote control (C) se observa un ligero aumento de la firmeza en el transcurso del tiempo de almacenamiento que se puede considerar mínimo a comparación del lote de fajitas marinadas de vinagre y sal (M). Las fajitas de pollo presentaron una mayor firmeza en la prueba de punción debido al previo proceso de marinado. Resaltándose que la irradiación de luz UV-C propició al mismo comportamiento y el valor de firmeza en el día 11 de almacenamiento fue el mayor de todos los lotes.

La exposición de las fajitas de pollo a la luz UV-C favoreció el endurecimiento de las fibras musculares de la pechuga de pollo, obteniendo una mayor integridad del tejido. Las miofibrillas, la unidad fundamental de la fibra muscular, se endurecen y contraen debido al daño celular provocado en la irradiación UV-C. En un estudio realizado por Park y Ha (2015), se ejecutó una evaluación sensorial en la que se observó que al aumentar la dosis de irradiación UV-C, la aceptabilidad del consumidor disminuye debido a que, con una dosis mayor se observan algunas modificaciones en el color, sabor, textura y apariencia de las pechugas de pollo. Se puede entonces considerar que una dosis menor de irradiación de UV-C en fajitas de pollo genere menor firmeza durante su almacenamiento.

Park y Ha (2015) evaluaron los efectos de la irradiación de UV-C en los parámetros de calidad sensoriales y determinaron que no genera un cambio significativo en los valores de color, textura y apariencia general de pechuga de pollo. No encontraron diferencias estadísticamente significativas entre estas propiedades en la carne de pollo irradiada a diferentes dosis y con la carne de pollo fresca. No obstante, de acuerdo a la Figura 19, en el lote UV-C sí se tienen diferencias significativas a comparación con el lote control.

El lote (US), ultrasonido aplicado a las fajitas de pollo, tiene una tendencia similar en aumento de la firmeza como el lote (M), fajitas sólo marinadas. No obstante, en la prueba de resistencia al corte, el lote (US) presentó una disminución de la firmeza de las fajitas de pollo durante el tiempo de almacenamiento. En contraste con la prueba de punción, en la cual se tiene un comportamiento cinético en aumento lo cual se debe a la penetración de la fajita de pollo, pues este proceso ocurre por la parte central de la misma, donde los tejidos musculares pueden ser firmes e irregulares, además de que la grasa de la pechuga de pollo está presente. Mismo comportamiento se observa en el lote UV/US. La irradiación UV-C y el ultrasonido como tecnologías de procesamiento y conservación modificaron la firmeza de fajitas de pollo haciendo que ésta aumente durante su almacenamiento.

No obstante, la incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero favorecieron a la conservación de la firmeza de las fajitas de pollo, en el lote (Ncs) no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el almacenamiento en refrigeración a 2 °C. La firmeza de las fajitas de pollo con nanocápsulas de aceite esencial de romero incorporadas al marinado y además tratadas con ultrasonido, lote (Ncs/US), aumentó ligeramente durante los días de almacenamiento. Por su parte, la combinación de las tecnologías de irradiación UV-C, ultrasonido y nanocápsulas propiciaron a que en la firmeza de las fajitas con nanocápsulas, tratadas con ultrasonido e irradiadas de luz UV-C, lote (Ncs/UV/US), aumentara hasta el día 3 y después se mantuviera estable, sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el resto del almacenamiento.

La firmeza, medida como la fuerza de penetración tiende a aumentar, señal del deterioro de la carne debido a la pérdida de humedad. El momento oportuno del sacrificio del pollo corresponde a aquel en el cual se obtenga mayor rendimiento de la canal y el contenido de grasa que asegure su conservación, sabor y jugosidad (Bianchi et al., 2008).

3.2.6. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) se expresa como la cantidad de agua retenida por un alimento cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Esta propiedad se relaciona con las características de jugosidad, color y terneza de la carne fresca, así como el rendimiento másico en la cocción de los productos (Forrest et al., 1979). La prueba de capacidad de retención de agua es relevante para el análisis de los parámetros de calidad en carne de pollo porque tiene relación con otras propiedades, como el pH. Si se presenta una disminución del pH en la carne, la CRA también disminuye. La Figura 20 muestra el comportamiento de la capacidad de retención de agua de fajitas de pollo. Se observa una disminución de la CRA en todos los lotes de acuerdo a los días de almacenamiento.

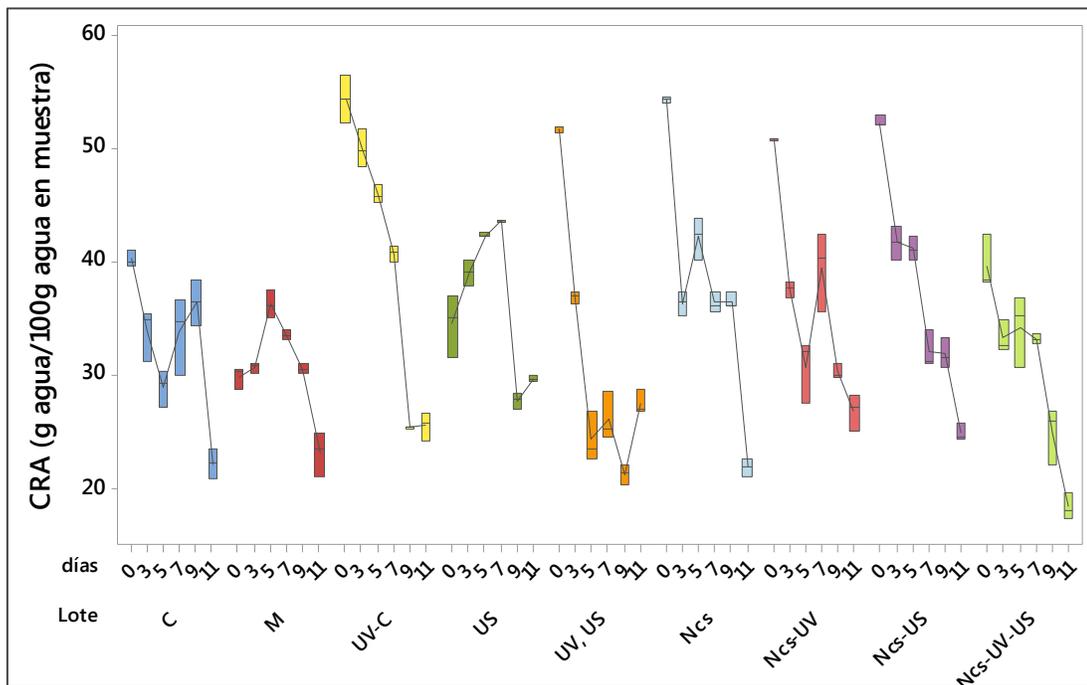


Figura 20. Cambios en la CRA de las fajitas con diferentes tratamientos y días de almacenamiento.

El lote de fajitas de pechuga de pollo control (C) presentó una pérdida de la CRA del 3 % al tercer día de su conservación; sin embargo, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en los siguientes días de almacenamiento.

Se observa una disminución de la CRA al día 11 de almacenamiento del lote control, causado por el deterioro del alimento y el tiempo de conservación del mismo. Por su parte, la capacidad de retención de agua de fajitas del lote (M) no presentó diferencias estadísticamente significativas hasta el día 9 de almacenamiento y una pérdida de CRA del % en el día 11. Resaltándose que las fajitas de pollo del lote UV-C presentaron la mayor capacidad de retención de agua al inicio debido a que la irradiación de luz UV-C tiene un efecto en las fibras musculares de la carne de pollo, haciendo que la retención de agua se incremente. No obstante, la CRA disminuyó y se estabilizó al día 9 sin presentar diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en el resto del almacenamiento.

Las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido, lote US, presentaron una CRA en aumento en un 12.5 % al día 7, pues el procesamiento ultrasónico aceleró la transferencia de masa provocando que la sal aumentara la retención de agua. Sin embargo, la CRA disminuyó al día 9 debido a la muerte celular provocada por los choques micro-mecánicos y las altas presiones del ultrasonido lo cual conlleva a una liberación de agua. Chemat et al. (2011) mencionan que el ultrasonido ha sido utilizado en la producción de carne de pollo. La capacidad de retención de agua, el color del producto y el rendimiento másico se examinaron después del tratamiento con sal, o la sonicación o ambos. Muestras que recibieron tanto tratamiento con sal y ultrasonido fueron superiores en todas las cualidades. El ultrasonido mejora las propiedades físicas y texturales de la carne de pollo. El lote de fajitas de pollo tratadas con ultrasonido e irradiadas, (UV/US), tuvo una pérdida de CRA del 51 % al día 5, después no se presentaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Las nanocápsulas de aceite esencial de romero incorporadas al marinado tuvieron un efecto significativo en la CRA del alimento, los lotes que contienen nanopartículas presentaron un comportamiento en disminución. En el lote Ncs, se observó una estabilidad de la CRA del día 3 al 9 de almacenamiento, pero después una disminución lo cual se debe al deterioro y pérdida de firmeza de las fajitas de pechuga de pollo. El lote de Ncs/UV/US presentó la menor capacidad de retención de agua en las fajitas de pollo y su disminución fue gradual conforme los días de almacenamiento con una pérdida de CRA del 55 % con respecto a la condición inicial. El valor final de CRA en este lote resultó el menor, puesto que las miofibrillas que retienen el agua pudieron dañarse durante el tratamiento.

La capacidad de retención de agua de la carne es dependiente del pH y del medio iónico en el que se encuentren las proteínas. La carga total de las proteínas y de las interacciones electrostáticas, alcanzan su mayor intensidad en el punto isoeléctrico. La CRA es mínima en el intervalo 5.0 a 5.1 (Belitz y Grosch, 2012). En todas las fajitas de pollo se aplicó el marinado, el cual disminuyó el pH, razón por la que la CRA disminuyó de manera drástica.

De acuerdo a Alarcon-Rojo et al. (2015), el ultrasonido en la carne de pollo marinada, facilita la liberación de las proteínas miofibrilares, responsables de la capacidad de retención de agua, firmeza y cohesión de los productos cárnicos y avícolas. La CRA depende de los cambios *post mortem* de las estructuras miofibrilares, y por lo tanto, la firmeza de la carne está relacionada a las diferencias en la distribución del agua durante la conversión de músculo a carne. Andújar et al. (2003) mencionan que las miofibrillas retienen agua debido a que forman un retículo tridimensional de filamentos y la cantidad de agua inmovilizada depende del espacio existente entre los filamentos, lo que se pone de manifiesto observando el efecto del pH sobre la capacidad de retención de agua.

Como ya se mencionó, en muestras de carne con pH entre 5.0 y 5.1, se aprecia un mínimo de CRA, valor que corresponde aproximadamente al punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares e indica el pH al que la carga neta de las moléculas proteicas es mínima. Se ha reportado por Yusop et al. (2011), que las sustancias ácidas tienen un mayor efecto en el ablandamiento y el sabor de la carne tratada, causando el hinchamiento de las fibras de la carne. Los marinados ácidos en la carne de pollo involucran diversos factores funcionales, incluyendo el debilitamiento de las estructuras debido al hinchamiento de la carne. El ácido del marinado causa la degradación de los tejidos de carne de aves, ablandando el alimento y causando que absorba más líquido, haciéndola más jugosa.

De acuerdo con Zhuang et al. (2007), en su estudio sobre las propiedades dieléctricas de los músculos de pechuga de pollo, la CRA es significativamente diferente en cada músculo de la pechuga de pollo, el pectoral menor tiene mayor CRA que el pectoral mayor. Los resultados demostraron que hay diferencias significativas en las características de calidad entre las muestras, como el color, pH, humedad, líquido drenado, CRA. El pectoral menor tiene un color más oscuro, mayor pH, menor líquido drenado y mayor capacidad de retención de agua, a comparación del pectoral mayor.

3.2.7. Determinación de actividad de agua

La actividad de agua es un parámetro adimensional que se calcula como una relación de la presión de vapor de agua del alimento entre la presión de vapor del agua pura. La a_w se relaciona con la textura de los alimentos. Aquellos con una actividad de agua elevada tienen una textura más jugosa, tierna y masticable. Cuando ésta disminuye, se observan atributos de textura indeseables como dureza y sequedad (Badui, 2002). La Figura 19 muestra que la actividad de agua de las fajitas de pollo tendió a disminuir durante los días de almacenamiento a 2 °C. Este comportamiento se debe a la pérdida de agua del producto.

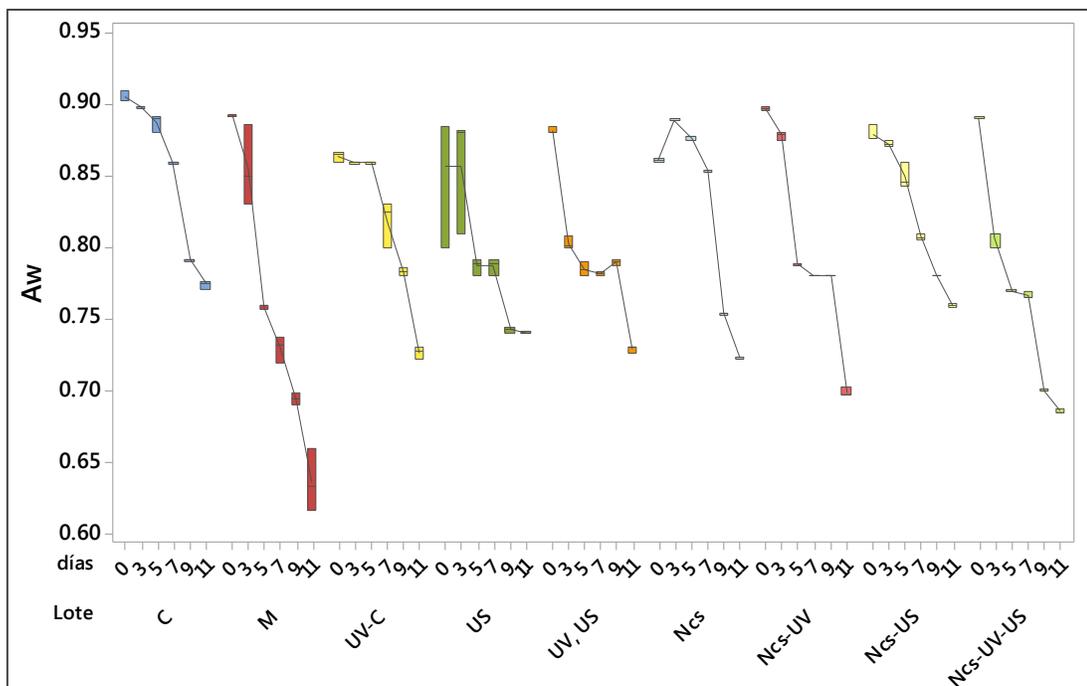


Figura 21. Cambios en la a_w de fajitas de pollo con diferentes tratamientos en su almacenamiento a 2°C.

El lote de fajitas control (C) presentó una a_w inicial del 0.9, y se tuvo una pérdida del 15 % al día 11 almacenamiento. Las fajitas de pollo de este lote no fueron sometidas a algún tratamiento de conservación, y se puede decir que la pérdida de actividad acuosa resultante es normal para la pechuga de pollo almacenada en bajas temperaturas.

Resaltándose que la pérdida de actividad de agua de las fajitas de pollo marinadas con vinagre y sal, lote (M), fue del 27.7 %, éste presentó la menor a_w debido a la sal incorporada en el proceso de marinado, la cual ocupa el lugar del agua en el alimento mediante la difusión. El proceso de desecación se acelera a causa de los ingredientes en el marinado. Por su parte, el lote UV-C tuvo una pérdida de actividad de agua del 15 % con respecto al valor inicial, comportamiento similar al lote control.

Cabe mencionar que la actividad de agua inicial en las fajitas de pollo irradiadas con luz UV-C fue aproximadamente del 0.86, menor que en las fajitas en estado fresco. Esto se debe a que la exposición a la luz ultravioleta genera una pérdida de agua en el proceso. Sin embargo, este valor se mantuvo sin diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) hasta el día 5 de almacenamiento. Posteriormente, disminuyó durante el resto del almacenamiento. Del mismo modo, la Figura 21 muestra que la actividad de agua de las fajitas sometidas a ultrasonido, lote US, tuvo un comportamiento similar con una pérdida del 12 %.

Por su parte, la actividad acuosa de las fajitas de pollo sometidas a ultrasonido durante el marinado e irradiadas con luz UV-C, lote (UV/US), también disminuyó en un 15 % con respecto a valor inicial. Las tecnologías de ultrasonido e irradiación ultravioleta (UV-C) controlan la disminución de actividad de agua en el alimento, pues la pérdida de esta propiedad durante los días de almacenamiento no fue significativa al igual que el lote de fajitas de pollo sólo marinadas con vinagre y sal (M).

La actividad de agua de las fajitas de pollo marinadas con vinagre, sal y nanocápsulas de aceite esencial de romero, lote (Ncs), se mantuvo estable durante 7 días de almacenamiento, lo cual implica que no se tuvieron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en ese periodo. No obstante, la pérdida de agua del alimento es inevitable en la conservación a bajas temperaturas, y se presentó una disminución en la a_w durante el resto del almacenamiento. Cabe mencionar que, la pérdida de la actividad de agua de las fajitas de pollo del lote (Ncs) se debe a que los ingredientes del marinado, como la sal y las nanopartículas, migran al alimento y ocupan el lugar del agua en éste. La incorporación de nanocápsulas del aceite esencial ayudó a preservar la a_w de las fajitas de pollo cuando se sometieron al procesamiento con ultrasonido, pues la pérdida de actividad acuosa resultante de las fajitas con nanocápsulas y sonicadas, lote (Ncs/US), fue del 11.5 %.

En cuanto a las fajitas de pollo con nanocápsulas e irradiadas con luz UV-C, lote (Ncs/UV), se tuvo una pérdida de la a_w del 21.34 % con respecto a la condición inicial. Y en el lote de fajitas con nanocápsulas tratadas con ultrasonido e irradiadas (Ncs/UV/US), un porcentaje del 23 % de pérdida de actividad acuosa durante el almacenamiento de las fajitas de pollo a 2 °C. Razón por la cual, se considera que la aplicación de estas tecnologías en conjunto no preservan la a_w del producto debido a su interacción en la desecación del mismo.

La Tabla 9 muestra los cambios en la actividad de agua de las fajitas de pollo durante los días de almacenamiento a 2 °C. A pesar de los distintos tratamientos de procesamiento y conservación aplicados a las fajitas de pollo, la actividad de agua de éstas tendió a disminuir. Resaltándose un comportamiento similar entre el lote UV/US, US y el control.

Tabla 9. *Cambios en la actividad de agua de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2°C.*

Tratamientos	Días de almacenamiento a 2 °C					
	0	3	5	7	9	11
CONTROL	0.91	0.89	0.90	0.86	0.79	0.77
MARINADO	0.89	0.86	0.76	0.73	0.69	0.64
ULTRASONIDO	0.86	0.86	0.79	0.79	0.74	0.74
UV-C	0.86	0.82	0.86	0.86	0.73	0.78
UV/ULTRASONIDO	0.80	0.88	0.79	0.79	0.73	0.79
NANOCÁPSULAS	0.86	0.89	0.88	0.85	0.75	0.72
NANO/ULTRASONIDO	0.88	0.87	0.85	0.81	0.78	0.76
NANO/UV-C	0.90	0.88	0.79	0.78	0.70	0.78
N/UV/ULTRASONIDO	0.89	0.81	0.77	0.77	0.70	0.69

La actividad de agua es un factor crítico que determina la vida útil de los productos. Este parámetro establece el límite para el desarrollo de microorganismos, mientras que otros factores como temperatura y pH influyen en la velocidad de crecimiento (Badui, 2002). La materia prima está altamente expuesta al ataque microbiano, aún en condiciones de almacenamiento en refrigeración, por lo que será necesario someterla a un proceso térmico para reducir la a_w , y por ende, prolongar su vida de anaquel (Belitz y Grosch, 2012).

Gracias a los tratamientos aplicados, no es necesario someter a las fajitas de pollo a un proceso térmico, puesto que las tecnologías emergentes utilizadas logran conservar los alimentos por más tiempo sin modificar de manera relevante sus propiedades.

3.2.8. Determinación de pH

El pH está relacionado directamente con el potencial de óxido-reducción, es el responsable de mantener cierta inocuidad en el alimento, ya que este potencial afecta directamente al crecimiento de microorganismos, inclusive los patógenos (Lawrie, 1967). La aparición del *rigor mortis* en la carne de pollo es determinante en su pH final, ésta tiene lugar entre las 2 y 4 horas posteriores al sacrificio, habiéndose considerado que son necesarias al menos de 4 a 6 horas para obtener una terneza adecuada en el músculo *Pectoralis major* en la pechuga (Liu et al., 2010). La Figura 22 muestra los cambios del pH en fajitas de pollo almacenadas a 2 °C durante 11 días.

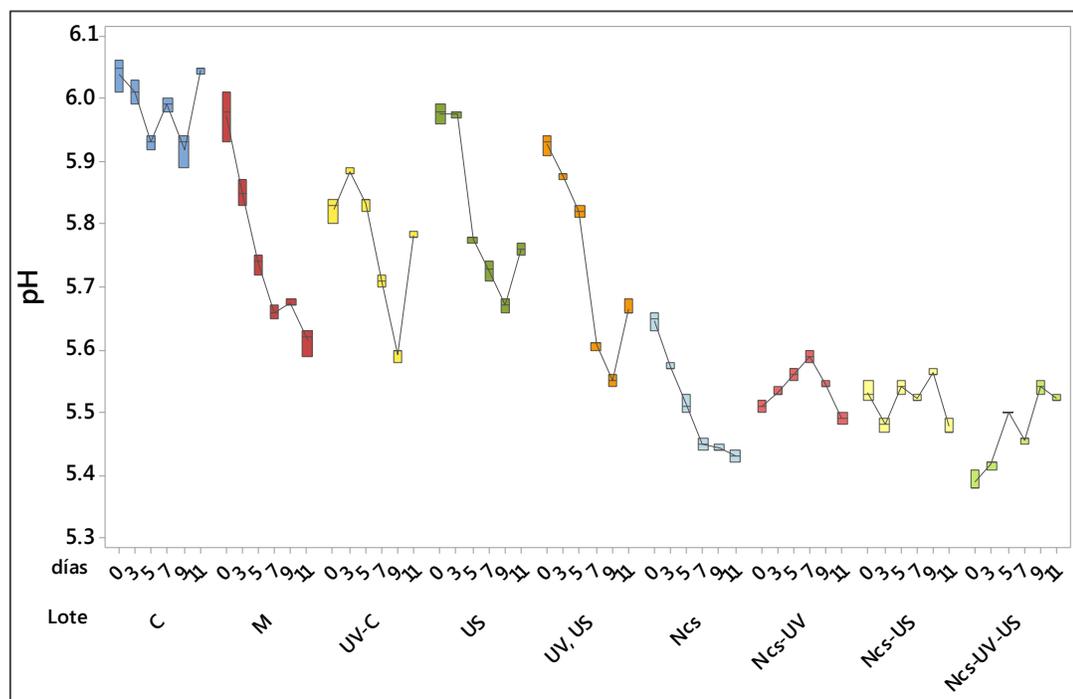


Figura 22. Cambios en el pH en fajitas con diferentes tratamientos y almacenadas a 2°C.

El pH de las fajitas del lote control se presentó sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el almacenamiento, en valores de entre 5,9 y 6,1. Por su parte, el pH del lote de fajitas marinadas (M) presentó una disminución gradual conforme los días de almacenamiento, el cual se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) desde el día 7 al resto del almacenamiento. La incorporación del marinado tiene un efecto en el pH de la carne de pollo porque, una vez que se somete a las fajitas de pollo al líquido, se modifica el pH y la acidez de la misma.

El pH de las fajitas irradiadas de luz UV-C en el día cero es menor al de las fajitas control debido al proceso de marinado y del tratamiento con luz ultravioleta. No obstante, éste se mantuvo estable en los primeros 5 días de almacenamiento y después disminuyó. Resaltándose que el pH del lote de fajitas tratadas con ultrasonido (US), comenzó con valores similares al control, y éste presentó una disminución hasta el día 5 y después no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el resto del almacenamiento. El ultrasonido aplicado a las fajitas de pollo favoreció la disminución del pH debido a la infiltración de los ingredientes del marinado a los poros de la carne. Sin embargo, este tratamiento ayudó a estabilizar el pH en valores aproximados al 5,7.

Los menores valores de pH se presentaron en los lotes de fajitas de pollo a los cuales se les incorporaron nanocápsulas de aceite esencial de romero durante el proceso de marinado. Comportamiento similar se observa en el lote de fajitas con nanocápsulas irradiadas con UV-C (Ncs/UV) y el con ultrasonido (Ncs/US), en los cuales el pH se mantuvo estable, sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el almacenamiento.

La calidad fisicoquímica de la carne se desarrolla durante el proceso *post mortem*, a través de una variedad de procesos bioquímicos. La calidad de la carne final es una resultante de la evolución de la temperatura y el pH en el periodo *post mortem*. Los atributos físicos de calidad que son influenciados por la temperatura y el pH son la terneza, la capacidad de retención de agua y el color (Hamoen, 2013). En general, una carne más pálida de lo normal está asociada a un pH bajo, una humedad superficial elevada y baja capacidad de retención de agua. El efecto de la aplicación de frío tiene impacto en la reducción de pH y en la generación de carnes pálidas (James et al., 2006).

Andújar et al., (2003) mencionan que si el pH se encuentra por encima del punto isoeléctrico (5,0 a 5,1) de las proteínas miofibrilares, los filamentos se abren y se deja mayor espacio a las moléculas de agua. De la misma forma, el exceso de cargas positivas a bajos valores de pH, provoca una repulsión y aumenta el volumen de los miofilamentos. En las fajitas de pollo tratadas con irradiación UV-C, ultrasonido y/o nanocápsulas, se observó una disminución del pH por encima del punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares, lo cual aumentó la capacidad de retención de agua en el día cero.

De acuerdo con Chun et al. (2010) existe una relación en el pH de la pechuga y el color (valores de L^* , a^* y b^*). Según su estudio, en la pechuga de pollo fresca el pH incrementa generando un oscurecimiento en la carne de pollo durante su almacenamiento. Por su parte, las muestras irradiadas con UV-C a distintas dosis presentaron una disminución en el pH, sin cambios significativos en los valores de L^* , a^* y b^* . También determinaron que las pechugas de pollo irradiadas en diferentes dosis mantuvieron un pH similar durante los primeros 2 días de almacenamiento. No obstante, estos valores se modificaron después del transcurso de 6 días en almacenamiento. En general, el valor de pH de productos avícolas se modifica en ese tiempo, debido a que existe una disminución de la disociación de electrolitos y un incremento en la formación de amoníaco.

Además, Chun et al. (2010) estudiaron el efecto de la irradiación UV-C en la inactivación de patógenos y la calidad de la pechuga de pollo durante su almacenamiento. Se encontró una reducción significativa de ciertos microorganismos inoculados en la carne, el pH de la pechuga control incrementó más a comparación que las muestras irradiadas a distintas dosis. La evaluación de estas propiedades resultó que los productos irradiados aumentan la seguridad microbiana de las pechugas de pollo, sin modificar su calidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que, aunque no se cuantificó la carga microbiana de las fajitas de pollo durante su almacenamiento, aquellas irradiadas con UV-C y/o procesadas con ultrasonido mantuvieron sus parámetros de calidad y no manifestaron señales de deterioro durante su refrigeración. Por lo que se concluye que la seguridad de las fajitas de pollo aumentó al someterlas a estos tratamientos de procesamiento y conservación.

3.2.9. Determinación del porcentaje de ácido láctico

La acidez titulable es el procedimiento usual para determinar la concentración total de ácidos, una alícuota de la solución que contiene el ácido se titula con la solución estándar alcalina hasta el punto en el cual una cantidad equivalente haya sido añadida (Andújar et al., 2003). La cantidad de ácido láctico producido a partir del glucógeno, durante la glucólisis *post mortem*, será menor cuando se ha reducido la cantidad de glucógeno por fatiga, ayuno o estrés de los animales antes del sacrificio. El pH y el porcentaje de ácido tienen gran importancia en el crecimiento microbiano (Lawrie, 1967). La cantidad de ácido láctico en las fajitas de pollo tiene una relación directa con el pH del alimento. Al aumentar el porcentaje de acidez, el pH disminuye. La Figura 23 muestra los cambios en el porcentaje de ácido láctico en las fajitas de pechuga de pollo durante el almacenamiento.

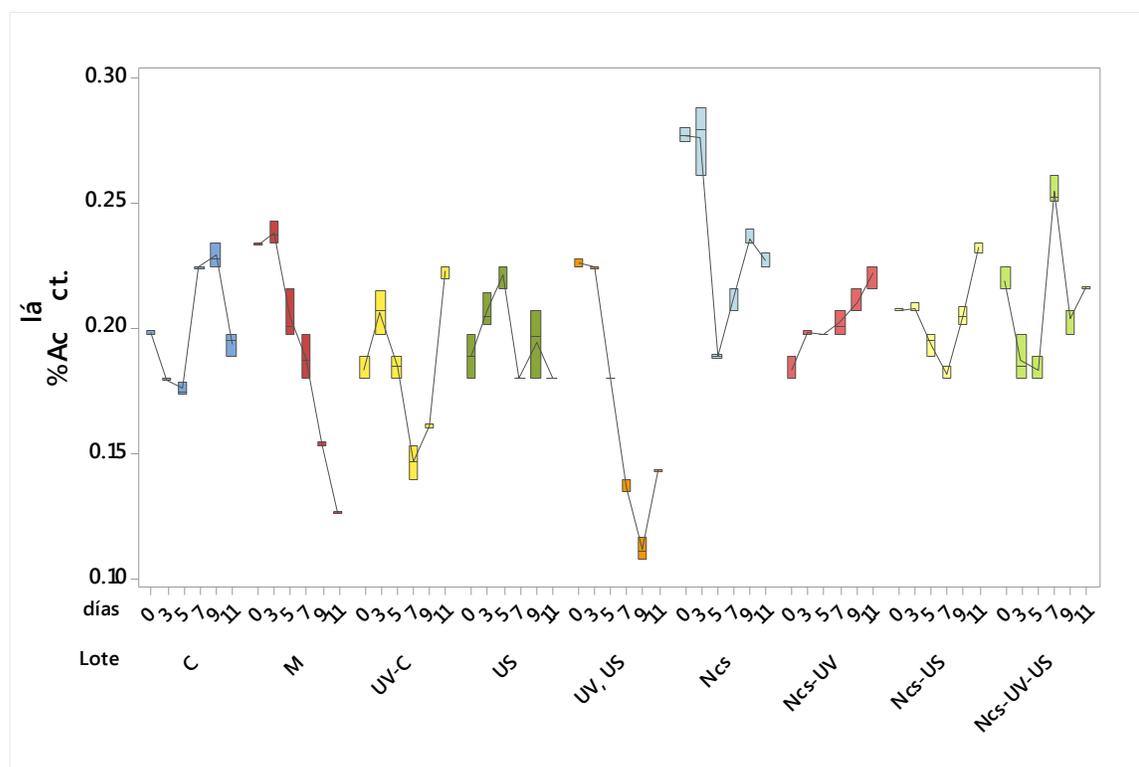


Figura 23. Cambios en el porcentaje de ácido láctico de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2 °C.

En el lote control, el porcentaje de ácido láctico se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$), al igual que el pH durante su almacenamiento a 2 °C. No obstante, el lote de fajitas marinadas (M), presentó una disminución del ácido láctico y del pH en el transcurso de su almacenamiento. Aunque se esperaría un aumento en la acidez, se debe considerar que el porcentaje de ácido láctico disminuyó en las fajitas marinadas debido a la presencia del ácido acético en el vinagre del marinado, el cuál no fue cuantificable en esta prueba. El ácido acético es el responsable de la disminución del pH en las fajitas marinadas, dando como consecuencia una de reducción de la concentración del ácido láctico.

El ácido láctico de las fajitas irradiadas, lote UV-C, se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en los primeros 5 días de almacenamiento. Después, a pesar de que se presentó una disminución en este parámetro, el valor final del % de ácido láctico fue cercano al inicial. Por lo que se refiere a las fajitas tratadas con ultrasonido durante el marinado, lote (US), el ácido láctico presente en las fajitas de pollo no tuvo diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) durante el almacenamiento, lo que implica que el ultrasonido favoreció a un porcentaje de acidez estable en las fajitas de pollo a lo largo de su conservación.

Por el contrario, en las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido e irradiadas con luz UV-C, lote (UV/US), presentó una disminución del porcentaje de ácido láctico del 45 % durante su almacenamiento a 2 °C. Siendo este lote de fajitas de pollo el que presentó los menores valores de ácido láctico resultante. Como ya se mencionó, este comportamiento se debe a la incorporación de ácido acético en el proceso de marinado de las fajitas. A su vez, las fajitas de pollo con nanocápsulas, lote (Ncs), presentaron el mayor valor de porcentaje de ácido láctico a comparación de las fajitas con otros tratamientos. No obstante, se presentó una disminución del porcentaje de ácido láctico del 30 % al día 5 de almacenamiento y después se mantuvo estable sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en el resto del almacenamiento.

La incorporación de nanocápsulas de aceite esencial de romero favoreció el aumento de ácido láctico en las fajitas de pollo en su condición inicial. Es importante resaltar que el marinado con nanocápsulas de aceite esencial de romero e irradiación con luz UV-C, lote (Ncs/UV), ayudó a mantener los porcentajes de ácido láctico en las fajitas de pollo.

Las nanocápsulas de aceite esencial de romero junto con la irradiación UV-C tuvieron un efecto en la acidez de las fajitas de pollo, logrando que no existiera una diferencia significativa a la condición inicial. Comportamiento similar se observa en el porcentaje de ácido láctico de las fajitas de pollo con nanocápsulas incorporadas al marinado y tratadas con ultrasonido, lote (Ncs/US), donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) hasta el día 9 de almacenamiento. Después, el porcentaje de ácido aumentó al día 11 debido a la disminución del pH en la carne.

La acumulación de ácido láctico en las primeras fases del periodo *post mortem* puede tener un efecto negativo en la calidad de la carne de pollo. El desarrollo de condiciones ácidas en el músculo da lugar a la desnaturalización de las proteínas miofibrilares. El grado de desnaturalización dependerá de la temperatura alcanzada y el descenso del pH (Forrest et al., 1979). Las fajitas de pollo marinadas con nanocápsulas, tratadas con ultrasonido e irradiadas con UV-C, lote (Ncs/UV/US), presentaron un comportamiento estable en el porcentaje de ácido láctico durante los de almacenamiento a 2 °C.

3.2.10. Determinación de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica representa un enfoque alternativo para la estimación de la calidad de carne y productos cárnicos (Saelin et al., 2011). Además tiene relación con la capacidad de retención de agua, pH, entre otros. El agua retenida en los espacios entre los filamentos de la carne genera un cambio en el contenido y distribución del agua dentro del alimento, influyendo en las propiedades eléctricas musculares. La medición de la conductividad eléctrica es un indicador de integridad de la membrana de la carne. Por lo tanto, esta propiedad es una medida indirecta de la pérdida por goteo, o líquido drenado.

La Figura 24 muestra los cambios en la conductividad eléctrica de las fajitas de pollo almacenadas a 2 °C. El lote de fajitas control (C) presentó un aumento en la conductividad eléctrica en los primeros días de almacenamiento, este comportamiento es debido a la liberación de líquido que el alimento presenta. No obstante, después del día 7, las fajitas de pollo perdieron la mayor cantidad de agua en un proceso de desecación, razón por la cual la conductividad eléctrica del lote control disminuye.

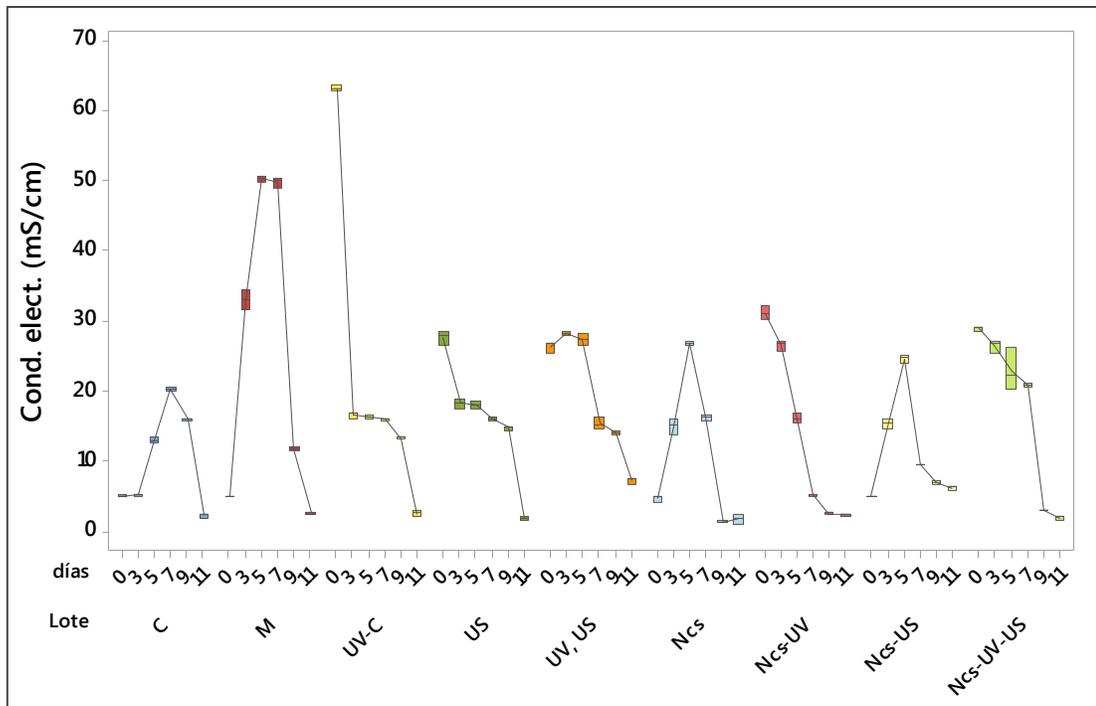


Figura 24. Cambios en la conductividad eléctrica de fajitas de pollo durante su almacenamiento a 2°C.

La conductividad eléctrica en las fajitas marinadas, lote (M), aumentó en un 90 % durante los primeros días de almacenamiento, lo cual implica que el proceso y los ingredientes del marinado favorecieron la retención de humedad del alimento. El valor disminuyó después del día 7 de conservación debido a la pérdida de agua por goteo o líquido drenado del alimento. Resaltándose que la irradiación de luz UV-C en las fajitas de pollo tuvo un efecto significativo en la conductividad eléctrica de las mismas, pues ésta disminuyó conforme los días de almacenamiento a 2 °C del producto. La conductividad eléctrica se redujo al mismo tiempo que la capacidad de retención de agua de las fajitas de pollo irradiadas.

Cabe mencionar que el valor inicial de conductividad eléctrica en las fajitas de pollo irradiadas (lote UV-C), fue el mayor, aunque se tuvo una pérdida del 92.3 % durante el almacenamiento. Comportamiento similar se presentó en las fajitas de pollo tratadas con ultrasonido, pues la conductividad eléctrica del lote (US) y del lote de fajitas de pollo tratadas con ultrasonido e irradiadas (UV/US), disminuyó durante el almacenamiento del producto a 2 °C.

Sin embargo, la pérdida de conductividad eléctrica fue aproximadamente del 80 % con respecto a la condición inicial para ambos lotes (US y UV/US). La actividad de agua de la pechuga de pollo disminuye durante su conservación a bajas temperaturas y por consiguiente, la conductividad eléctrica también.

Por su parte, los lotes de fajitas de pollo con nanocápsulas de aceite esencial de romero incorporadas en el marinado, presentaron los menores valores de conductividad eléctrica debido a que en estos, la integridad de la membrana de la carne de pollo se modificó. Es decir, las fajitas de pollo de los lotes con nanocápsulas presentaron la menor firmeza y una mayor disminución de la capacidad de retención de agua. Por esta razón, su conductividad eléctrica resultó menor. Sin embargo, en el lote de fajitas con nanocápsulas (Ncs) se presentó un aumento de la conductividad debida a la retención de humedad en los primeros días de almacenamiento, que posteriormente disminuyó al día 9 de almacenamiento y se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) en el resto de su conservación.

Mismo comportamiento se observa en el lote de fajitas de pollo con nanocápsulas de aceite esencial de romero tratadas con ultrasonido (Ncs/US), donde la conductividad eléctrica se estabilizó al día 7 de almacenamiento. La conductividad eléctrica de las fajitas de pollo con nanocápsulas de aceite esencial de romero en los lotes con irradiación UV-C (Ncs/UV) y con irradiación UV-C y ultrasonido (Ncs/UV/US) presentó un comportamiento en disminución debido a los días de almacenamiento y la pérdida en la retención de humedad de la pechuga de pollo. La aplicación de estas tecnologías genera cambios en la matriz del alimento y modifica sus propiedades fisicoquímicas durante los primeros días de almacenamiento a 2 °C. No obstante, las características finales de las fajitas de pollo no se ven modificadas en gran medida conservándolas por más tiempo.

CONCLUSIONES

El tratamiento ultrasónico en conjunto con las nanocápsulas de aceite esencial de romero contribuyó a disminuir la pérdida de peso y el líquido drenado de las fajitas de pollo. Además se demostró que el ultrasonido mejora la capacidad de retención de agua durante el almacenamiento. Por su parte, se observó un efecto sinérgico favorable en la retención de agua de las fajitas sometidas a ultrasonido y a irradiación UV-C.

La actividad de agua de las fajitas de pollo disminuye durante su almacenamiento, sin embargo se demostró que el procesamiento ultrasónico y las nanocápsulas de aceite esencial de romero contribuyen a mantener la integridad de la carne de pollo, disminuyendo su desecación y, de esa manera, conservando su conductividad eléctrica. A su vez, el pH presentó comportamiento estable en las fajitas de pollo irradiadas con luz UV-C y en aquellas sometidas a ultrasonido con y sin nanocápsulas. Los procesos combinados: irradiación UV-C, ultrasonido y nanocápsulas presentaron una correlación positiva en la estabilidad del ácido láctico de las fajitas, disminuyendo su deterioro.

La presencia de nanocápsulas en el marinado de la pechuga de pollo resultó favorable en su firmeza y, en conjunto con el ultrasonido, contribuyó de manera positiva en la jugosidad y la resistencia al corte. También fueron efectivos en la conservación de la luminosidad, cromaticidad y el ángulo de tono del alimento. Así mismo, el color de las fajitas sometidas a ultrasonido e irradiación UV-C se mantuvo estable durante su almacenamiento.

De esta manera las tecnologías emergentes, irradiación de luz UV-C, ultrasonido y la aplicación de nanocápsulas, benefician a la industria alimentaria debido a que garantizan la calidad final del producto y representan métodos alternativos de conservación que alargan la vida útil de un alimento de alto consumo, como la pechuga de pollo. La cual se mantiene fresca en refrigeración durante 1 o 2 días, propensa a la contaminación y deterioro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon-Rojo, A., Janacua, H., Rodríguez, J., Paniwnyk, L., Mason, T. (2015). Power ultrasound in meat processing. *Meat Science*, 107, 86-93.
- Alshammari, H., Jong-Hun, H., Byung-Chun, K., Irfan, A. (2018). The intertwine of nanotechnology with the food industry. A review: *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25, 27-30.
- Andújar, G., Pérez, D., Venegas, O. (2003). *Química y bioquímica de la carne y de los productos cárnicos*. Cuba: Editorial Universitaria.
- AOAC. (1975). Official Methods of Analysis. 12th edition. Washington D.C. Association of Official Analytical Chemist International.
- Avicultura carne. (2016). *Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial*. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200631/Panorama_Agroalimentario_Avicultura_Carne_2016.
- Avila-Sosa, R., Navarro-Cruz, A., Vera-López, O., Dávila-Márquez, R., Melgoza-Palma, N., Meza-Pluma, R. (2011). Romero (*Rosmarinus officinalis* L.): una revisión de sus usos no culinarios. *Ciencias y Mar*. 15(43), 23-36.
- Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D., Youssef, M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food. *Food Research International*, 48, 410-427.
- Badui, D. (2013). *Química de los alimentos*. México: Editorial Person Educación.
- Bajpai, V., Kamle, M., Shukla, S., Kumar, D., Chandra, P., Kyu, S., Kumar, P., Suk, Y., Young-Kyu, H. (2018). Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. A review: *Journal of Food and Drug Analysis*. 26, 1201-1214.
- Barbut, S. (2009). Pale, soft, and exudative poultry meat. Reviewing ways to manage at the processing plant. *Poultry Science*, 88, 1506-1512.
- Bazzano, M., Pisano, R., Brelstaff, J., Spillantini, M., Sidoryk-Wegrzynowicz, M., Rizza, G., Sangermano, M. (2016). Synthesis of polymeric nanocapsules by radical UV-activated interface-emulsion polymerization. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 54(20), 3357-3369.
- Belitz, H., Grosch, W. (2012). *Química de los alimentos*. 2a edición. España: Editorial Acribia S.A.
- Bianchi, G., Garibotto, G., Franco, J., Ballesteros, F., Betancur, O., Fredd, O. (2008). Calidad de carne ovina: Impacto en las decisiones tomadas a lo largo de la cadena. *UDELAR*. México: Departamento de producción animal y pasturas.

- Casaubon, M. (2017). *Alteraciones musculares en pollo de engorda*. Recuperado el 12/11/18. Disponible en: avicultura.mx
- Castañeda, M. (2013). *Calidad microbiológica de la carne de pollo*. Libro Técnico. Primera edición. México: UNAM.
- Chemat, F., Zill-e-Humma, Kamran, M. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (4), 813–835.
- Chouliara, E., Badeka, A., Savvaidis, I., Kontominas, M. (2008). Combined effect of irradiation and modified atmosphere packaging on shelf-life extension of chicken breast meat: Microbiological, chemical and sensory changes. *European Food Research and Technology*, 226(4), 877–888.
- Chun, H., Kim, J., Lee, B., Yu, D., Song, K. (2010). Effect of UV-C irradiation on the inactivation of inoculated pathogens and quality of chicken breasts during storage. *Food Control*, 21(3), 276–280.
- Cori, M., Michelangeli, C., De Basilio, V., Figueroa, R., Rivas, N. (2014). Solubilidad proteica, contenido de mioglobina, color y pH de la carne de pollo, gallina y codorniz. *Archivos de Zootecnia.*, 63 (241), 133-143.
- Domínguez, L., Parzanese, M. (2009). Luz ultravioleta en alimentos. *Alimentos Argentinos. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Gobierno Argentino*, 1(1), 71–73.
- Dong, A., Suk, K., Joo, E. (2013). Irradiation and additive combinations on the pathogen reduction and quality of poultry meat. *Poultry Science*, 92, 534-545.
- FAO/OMS. (2005) Comisión del Codex Alimentarius: Código de prácticas de higiene para la carne. Roma. Recuperado de: <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/codes-of-practice/es/>
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G., Weiss, J. (n.d.). *Ultrasound technologies for food and bioprocessing*. Alemania: Springer.
- Fletcher, D., Qiao, M., Smith, D. (2000). The relationship of raw broiler breast meat color and pH to cooked meat color and pH. *Poultry Science*, 79, 784-788.
- Forrest, C., Aberle, E., Hedrich, H., Judge, M., Merkel, R. (1979). *Fundamentos de ciencia de la carne*. España: Acribia.
- Galindo, M., et al. (2018). Optimization of the emulsification-diffusion method using ultrasound to prepare nanocapsules of different food-core oils. *LWT - Food Science and Technology*, 87, 333–341.
- Gertzou, J., Karabagias, I., Drosos, P., Riganakos, K. (2017). Effect of combination of ozonation and vacuum packaging on shelf life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Engineering*, 213, 18-26.
- Gómez, M., Gómez, N. (2013). Evaluación de la calidad de carne de pollo (*Pectoralis major* y *Pectoralis minor*) que se expende en la ciudad de san juan de pasto (Nariño).

Tesis Universidad de Nariño. España.

- Granata, G., Stracquadanio, S., Leonardi, M. (2018). Essential oils encapsulated in polymer-based nanocapsules as potential candidates for application in food preservation: A review. *Food Chemistry*, 269, 286–292.
- Grunert, G., Bredahl, L., Brunso, K. (2003). Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector. A review. *Meat Science*, 66, 259-272.
- Guo, Y., Huang, J., Sun, X., Lu, Q., Huang, M., Zhou, G. (2018). Effect of normal and modified atmosphere packaging on shelf life of roast chicken meat. *Journal of Food Safety*, 1–8.
- Hamoen, J., Vollebregt, H., Van Der Sman, R. (2013). Prediction of the time evolution of pH in meat. *Food Chemistry*, 144, 2363-2372.
- Haro, F., Guerrero, J. (2013). Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7, 68–77.
- Haughtony, P., Lyng, J., Cronin, D., Morgan, D., Fanning, S., Whyte, P. (2011). Efficacy of UV light treatment for the microbiological decontamination of chicken, associated packaging, and contact surfaces. *Journal of Food Protection*, 74 (4), 565-572.
- Honikel, K. (1998). Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science*, 49(4), 447-457.
- Honikel, D., Mortimer, S. (2014). Effect of genotype, gender and age on sheep meat quality and a case study illustrating integration of knowledge. *Meat Science*, 98, 544-555.
- Hu, J., Zhang, Y., Xiao, Z., Wang, X. (2018). Preparation and properties of cinnamon-thyme-ginger composite essential oil nanocapsules. *Industrial Crops and Products*, 122, 85–92.
- Informe Pastrán. (2017). *Consumo de carne de pollo*. Disponible en: <http://www.informepastran.com>
- Kaewthong, P., Wattanachant, S. (2017). Optimizing the electrical conductivity of marinade solution for water-holding capacity of broiler breast meat: A review. *Poultry Science*, 97(2), 701-708.
- Keklik, N. (2009). Decontamination of poultry products by pulsed UV-light. *ProQuest Dissertations and Theses*, 227.
- Kerry, J., Kerry, F., Ledward, D. (2002). *Meat processing: improving quality*. USA: CRC Press.
- King, T., Osmond-McLeod, M., Duffy, L. (2018). Nanotechnology in the food sector and potential applications for the poultry industry. A review: *Trends in Food Science & Technology*, 72, 62-73.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D. (2004). Applications and potential of ultrasonic in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 261-266.

- Koutchma, T., Forney, L., Moraru, C. (2009). *Ultraviolet light in food technology*. USA: CRC Press.
- James, C., Vincent, C., Andrade, T., James, S. (2006). The primary chilling of poultry carcasses: A review. *International Journal of Refrigeration*, 29, 847-862.
- Jayasena, D., Jo, C. (2013). Essential oils as potential antimicrobial agents in meat and meat products: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 34, 96-108.
- Lawrie, A. (1967). *Ciencia de la carne*. España: Acribia.
- Lazaro, C., Conte-Júnior, C., Monteiro, M., Canto, A., Costa-Lima, B., Mano, S., Franco, R. (2014). Effects of ultraviolet light on biogenic amines and other quality indicators of chicken meat during refrigerated storage. *Poultry Science*, 93(9), 2304–2313.
- Letchford, K., Burt, H. (2006). A review of the formation and classification of amphiphilic block copolymer nanoparticulate structures: micelles, nanospheres, nanocapsules and polymersomes. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 65, 259-269.
- Liu, Y., Lyon, B., Windham, W., Savage, E. (2004). Principal component analysis of physical, color, and sensory characteristics of chicken breast deboned at two, four, six and twenty-four hours post-mortem. *Poultry Science*, 83, 101-108.
- Lyon, E., Buhr, J. (1999). Bases bioquímicas de la textura de la carne. *Ciencia de la carne de ave*. España: Acribia.
- Martini, S. (2013). *Sonocrystallization of fats*. Springer. USA.
- Mason, T. (1998). Power ultrasound in food processing: the way forward. *Ultrasound in food processing*. Inglaterra: Chapman and Hall. p.p. 105-126.
- Meltem, N. (2009). *Decontamination of poultry products by pulsed UV-light*. Department of Agricultural and Biological Engineering. USA.
- Milicevic, D., Trbovic, D., Petrovic, Z., Jakovac-Strajnb, B., Nastasijevic, I., Koricanac, V. (2015). Physicochemical and functional properties of chicken meat: A review. *Procedia Food Science*, 5, 191-194.
- Norma Mexicana NMX-FF-080-2006. *Productos avícolas carne de pollo de engorda en canal y en piezas*. México: Dirección General de Normas.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-033-ZOO-1995. Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres. México: Dirección General de Normas.
- Olivera, D., Cárdenas, F. C. (2013). Luz UV-C , aceite esencial de oregano (*origanum vulgare*) y ácido láctico sobre la carne de pollo. *La Industria Cárnica Latinoamericana*, 195, 52–55.
- Park, S., Ha, S. (2015). Ultraviolet-C radiation on the fresh chicken breast: inactivation of major foodborne viruses and changes in physicochemical and sensory qualities of product. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 895–906.

- Qiao, M., Fletcher, D., Smith, D., Northcutt, J. (2001). The effect of broiler breast meat color on pH, moisture, water-holding capacity, and emulsification capacity: A review. *Poultry Science*, 80(5), 676-680.
- Realini, C., Marcos, B. (2014) Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98, 404-419.
- Renner, M. (1990). Factors involved in the discoloration of beef meat. *International Journal of Food Science Technology*, 25, 613-630.
- Rodríguez, D. (2011) La carne de pollo (procesamiento). Capítulo XV del libro *AVITECNIA Manejo de las aves domésticas más comunes*. México: Editorial Trillas.
- Rubenick, J., Rubim, A., Bellé, F., Nogueira-Librelotto, D., Bueno, C. (2017). Preparation of mupirocin-loaded polymeric nanocapsules using essential oil of rosemary: A review. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 53(1), 1–11.
- Saelin, S., Wattanachant, S. Youravoung, W. (2016). Evaluation of water holding capacity in broiler breast meat by electrical conductivity. *International Food Research Journal*, 24 (6), 2593-2598.
- Sarantópoulos, C., Vercelino, R., Contreras, C., Galvao, M., Gomes, T. (1998). Use of a modified atmosphere masterpack for extending the shelf life of chicken cuts. *Packaging Technology and Science*, 11(5), 217–229.
- Seabra, L., Zapata, J., Fuentes, M., Aguiar, C., Freitas, E., Rodrigues, M. (2001). Effect of deboning time, muscle tensioning, and calcium chloride marination on texture characteristics of chicken breast meat. *Journal of Poultry Science*, 80, 109-112.
- Smaoui, S., Hlima, B., Ghorbel, R. (2012). The effect of sodium lactate and lactic acid combinations on the microbial, sensory, and chemical attributes of marinated chicken thigh. *Poultry Science*, 91, 1473-1481.
- Suslick, K. (1998). *Kirk-othmer encyclopedia of chemical technology*. Vol. 26, J. Wiley & Sons: USA.
- Suslick, K., Didenko, Y., Fang, M., Hyeon, T., Kolbeck, K., McNamara III, W., Mdleleni, M., Wong, M. (1999). Acoustic cavitation and its chemical consequences. *The Royal Society*, 357, 335-353.
- Temprado, R. M. (2005). *Calidad de la carne de pollo. Selecciones avícolas* (Vol. 47).
- Thielke, S., Lhafi, S., Kühne, M. (2005). Effects of aging prior to freezing on poultry meat tenderness. *Journal of Poultry Science*, 84, 607-612.
- Tortora, G., Funke, B., Case, C. (2007). *Introducción a la microbiología*. 9ª edición. España: Editorial Médica Panamericana.
- Unión Nacional de Avicultores. (2014). *Estados productores de pollo en México*. Disponible en: <http://www.una.org.mx>
- USDA. (2007). Servicio de inocuidad e inspección de los alimentos. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. *Contenido de agua en carnes y aves*. Recuperado el

- 09/09/2018. Disponible en: https://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/0d924688-b15d-490e-87ba-fad5b9d87727/Water_in_Meat___Poultry_SP.pdf?MOD=AJPERES
- USDA. (2008). Servicio de inocuidad e inspección de los alimentos. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. *El color de las carnes y de las aves*. Recuperado el 09/09/2018. Disponible en: <http://www.fsis.usda.gov>
- USDA. (2015). Servicio de inocuidad e inspección de los alimentos. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. *La refrigeración y la inocuidad de los alimentos*. Disponible en: https://www.fsis.usda.gov/wps/portal/informational/enespanol/hojas_informativas/manejo-adeecuado-de-alimentos/la-refrigeracion
- USDA. (2018). Departamento de agricultura de los Estados Unidos. *National Nutrient Database for Standard Reference*. Recuperado el 24/01/2019. Disponible en: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/885?fgcd>
- Watanabe, A., Devine, C. (1996). Effect of meat ultimate pH on rate of titin and nebulin degradation. *Meat Science*, 42(4), 407-413.
- Wierbicki, E., Deatherage, F. (1958). Determination of water-holding capacity of fresh meats. *Food Chemistry*, 6, 387-392.
- Yao, L., Luo, Y., Sun, Y. and Shen, H. (2011). Establishment of kinetic models based on electrical conductivity and freshness indicators for the forecasting of crucian carp (*Carassius carassius*) freshness. *Journal of Food Engineering*, 107, 145-151.
- Yusop, S., O'Sullivan, M., Kerry, J. F., Kerry, J. P. (2010). Effect of marinating time and low pH on marinade performance and sensory acceptability of poultry meat. *Meat Science*, 85, 657-663.
- Yusop, S., O'Sullivan, M., Preub, M., Weber, H., Kerry, J. F., Kerry, J. P. (2011). Assessment of nanoparticle paprika oleoresin on marinating performance and sensory acceptance of poultry meat. *LWT - Food Science and Technology*, 46, 349-355.
- Zambrano-Zaragoza, M. (2018). Optimization of the emulsification-diffusion method using ultrasound to prepare nanocapsules of different food-core oils: A review. *LWT - Food Science and Technology*, 87, 333-341.
- Zhuang, H., Nelson, S., Trabelsi, S., Savage, E. (2007). Dielectric properties of uncooked chicken breast muscles from ten to one thousand eight hundred megahertz. *Poultry Science*, 86, 2433-2440.