



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Evaluación del efecto de las condiciones de rehidratación
de pechuga de pavo liofilizada en los algunos parámetros
físicos y fisicoquímicos**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

RUBÉN OMAR RUBIO LEÓN

ASESOR: M. en C. Jonathan Coria Hernández

COASESOR: Dra. Adriana Llorente Bousquets

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

**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**

Evaluación del efecto de las condiciones de rehidratación de pechuga de pavo liofilizada en algunos parámetros físicos y fisicoquímicos.

Que presenta el pasante: **Rubén Omar Rubio León**

Con número de cuenta: **307154842** 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 02 de Mayo de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez</u>	
VOCAL	<u>I.A. María Guadalupe López Franco</u>	
SECRETARIO	<u>M. en C. Jonathan Coria Hernández</u>	
1er. SUPLENTE	<u>M. en C. Sandra Margarita Rueda Enríquez</u>	
2do. SUPLENTE	<u>M. en C. Ana Elvia Sánchez Mendoza</u>	

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

LMCF/mmgm*

**El presente Trabajo de Tesis de Investigación fue desarrollado en el TMIA:
Taller de Procesos Tecnológicos de Productos Cárnicos en el Laboratorio 7
de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria UIM de la FES Cuautitlán
UNAM**

**Recibió apoyo del proyecto DGAPA-PAPIIT IT 202312
“ESTRATEGIAS DE BIOCONSERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA CARNE Y
PRODUCTOS CÁRNICOS”**

DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo a quien me dio la oportunidad de desenvolverme como alumno y proveer los recursos necesarios y siempre accesibles, quien me ha permitido saciar esta sed interminable de conocimiento, a mí amada **Universidad Nacional Autónoma de México**, por abrirme sus puertas desde nivel bachillerato en el **Colegio de Ciencias y Humanidades** y por darme continuidad educativa a nivel licenciatura en la **Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán**, y en especial, a la carrera de **Ingeniería en Alimentos**, por la gran formación como profesionistas y por moldear, orientar e impulsar nuestro carácter de ingenieros.

A mis padres, por haberme brindado mucho más que apoyo, consejos y aliento en todo este proceso educativo, por exigirme finalizar este ciclo tan hermoso de mi vida.

A mi esposa Ivonne, quien estuvo acompañándome en mis desveladas, impulsando mi aprendizaje y motivándome siempre en cada uno de los proyectos que desarrolle en esta casa de estudios.

A mi hija Leah, quien me motivo a siempre dar lo mejor de mí y mejorar no solo como profesionista, si no como ser humano. De quien estoy seguro se sentirá muy orgullosa algún día que llegue a leer este proyecto.

A mis hermanos, familiares y amigos, por esos momentos de apoyo, aliento y motivación, por siempre mostrarme la importancia de finalizar un proceso.

Dra Adriana Llorente Bousquets, porque desde un inicio nos compartió los conocimientos, los recursos y herramientas indispensables y necesarias en todo el desarrollo de este trabajo, por regalarme un poco mucho de su tiempo, esfuerzo e interés, por creer en mí y siempre estar pendiente en cada paso de este último trayecto como estudiante. Por poner su garra de leon en la revisión de este trabajo y darle un sentido más profesional y de mayor calidad.

A Mi mentor y amigo Jonathan Coria, por esa gran formación que impulsaste en mi como ingeniero, por compartir un poco de tu basto conocimiento en las diferentes áreas y temas que involucran esta investigación, por el gran e interminable apoyo y confianza que me ha brindado. Por hacerme ver el

lado alegre y tranquilo de la ingeniería, por mostrarme que a través del razonamiento se puede resolver cualquier cuestionamiento.

Mis alumnos del Instituto Nacional Para la Educación de Adultos, por demostrarme que no hay edad para iniciar o finalizar un proceso educativo, que pese a los obstáculos, problemas o dificultades, uno siempre debe de seguir adelante.

A mi amigo Oscar, por compartir todos esos gratos momentos durante el tiempo que estuvimos juntos en esta vida y de quien estoy seguro tuve apoyo desde el cielo.

A todos aquellos compañeros y colegas que buscan abrir camino en fenómenos como la liofilización y rehidratación de carne, espero que encuentren en esta investigación las respuestas a sus inquietantes dudas, que los oriente y despierte el interés de adentrarse e incluso desarrollar nuevas líneas de investigación dedicadas a estos temas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia **a mi señor Dios** por darme el tiempo necesario y permitirme finalizar un proceso más de aprendizaje, experiencias y amistades, por poner en mi camino a todas aquellas personas de quien sin su apoyo no hubiera logrado este éxito. Gracias por regalarme esta vida y proveerme todo cuanto necesito.

A la UNAM, por todo el apoyo que siempre brinda a todo aquel que busca una preparación educativa. Gracias y siempre estaré en deuda por darme tanto.

A mi padre José Rubio, por su gran esfuerzo y dedicación en la construcción de un ser humano con capacidades potenciales, porque gracias a tu sacrificio pude tener el privilegio de terminar una carrera profesional. Gracias por mostrarme siempre debemos de mostrarnos firmes y con coraje ante cualquier situación de la vida, que debemos de afrontar nuestros miedos y debemos vencerlos. Por todas esas historias y risas que siempre hacen un mejor día. En Verdad te amo. Y decirte que lo mejor de mí como hijo, es su fiel reflejo de ustedes como padres.

A mi madre María S. León. La palabra “gracias” no es suficiente para agradecer todo el amor, el sacrificio y el esfuerzo que desde siempre has dado por mí. De todas maneras, haré el intento y te agradeceré desde el fondo de mi corazón por ser como eres, por tu amor sin límites, por ser siempre

tan paciente y apoyarme desde mis primeros pasos, por darme fuerzas y aliento en obtener una formación profesional. Por enseñarme que la humildad es el mejor camino a la felicidad, de verdad gracias. Te amo.

A mi esposa Ivonne Castro. Después de cada momento de aprendizaje y experiencias obtenidas en cada día, no hay nada más que desee que estar a tu lado compartiendo los buenos momentos que me convierten en el hombre más feliz del mundo. A tu lado, soy lo mejor que puedo ser. Estaremos juntos por toda la vida. Gracias por tu inmenso apoyo en la realización de este proyecto. Te amo mucho.

A mi hija Leah Daniela, por hacer de este mundo algo maravilloso, por hacerme sonreír y compartir tanto amor. Por siempre ser mi motor que impulsa mi ser en el día a día. Por ser mi fuente de iluminación y color, gracias. Te amo muchísimo. Eres mi regalo imprescindible e indispensable para complementar mi felicidad.

A mis hermanos Ana y Fer. Nosotros nacimos de un mismo árbol, y ahora somos ramas que crecemos en diferente dirección. Sin embargo, nada de eso nada importa porque siempre nos unirán nuestras raíces y aunque tengamos nuestras diferencias siempre los voy a querer, gracias también por compartir un poco de su vida junto a la mía, por enseñarme y brindarme su apoyo.

A M. en C. Jonathan Coria, gracias por brindarme siempre momentos de conocimiento y sabiduría, gracias por el gran apoyo que me brindaste durante la carrera y sobre todo durante la realización de este proyecto. Te admiro y guardo un cariño muy especial por tanto que me otorgaste. Eres un gran maestro y una excelente persona.

A la doctora Adriana Llorente, de verdad que nunca tendré las palabras exactas que expresen mi agradecimiento y admiración por usted. Porque en gran medida pude realizar este proyecto gracias a su apoyo, tiempo, conocimiento, paciencia y confianza.

A la profesora Guadalupe López Franco, a quien le guardo un gran respeto y cariño, gracias por todos los consejos y conocimientos que me brindo durante la carrera, su paciencia y humildad la hacen diferente de los demás. Agradecerle por su apoyo y dedicación en la construcción de esta investigación y por compartirnos experiencia y sabiduría durante el taller.

Al jurado revisor integrado por I.B.Q. Saturnino, I. A. Guadalupe López Franco, M. en C. Jonathan Coria, M. en C. Sandra Margarita Rueda y M. en C. Ana Elvia Sánchez, por brindarme su apoyo, tiempo y conocimiento para la mejora y calidad de este trabajo.

A mis compañeros del taller de cárnicos, Nalle, Chore, Cesar y Mike, que hubiera sido del taller sin ustedes, gracias por todos esos momentos de aliento y apoyo que me brindaron, por todas esas sonrisas que compartimos juntos.

A mis amigos de la carrera: Toño, Alan, Mike, Arturo, Ere, Karen, Jared, Karla, Pato, Yare, Rosa, Alejandro, Nalle, Norma, porque gracias a ustedes mi instancia en la carrera fue muy agradable y junto a ustedes compartí momentos inolvidables, gracias por su cariño y apoyo.

A mis compañeros de trabajo del INEA, Migue, Manu, Dani, Wences, Petro, Lupita, Xoch, Mayra, Jesus, porque gracias a ustedes he aprendido bastante de la vida y porque me han enseñado a desenvolverme mejor en las actividades que realizo y siempre me han impulsado para que siga creciendo como persona, como profesional y como profesionista. Gracias.

A todos aquellos que en algún momento me han brindado cualquier tipo de apoyo, consejo, orientación y sobre todo que han creído en mí, de todo corazón les agradezco infinitamente.

“El hombre nada puede aprender sino en virtud de lo que sabe.”

Aristóteles

ABREVIATURAS

L	Litro	SSA	Secretaria de Salud
cm³	Centímetro cubico	SE	Secretaria de Economía
mL	Mililitro	NH₂	Amino
°C	Grados Celsius	RD	Resistencia a la deformación
kg	Kilogramo	Ca²⁺	Calcio
g	Gramo	Mg²⁺	Magnesio
K₁ – K₂	Constantes del Modelo de Peleg	kDa	Kilodalton
H₂O	Agua	-SH	Sulfhídrico
M	Molaridad	T_f	Temperatura final
Cl⁻	Cloro	T_c	Temperatura equilibrio
NOM	Norma Oficial Mexicana	T_i	Temperatura inicial
NMX	Norma Mexicana	h	Horas
ANOVA	Análisis de Varianza	s	Segundo
Na₅ P₃O₁₀	Tripolifosfato de Sodio (TPF)	min	Minuto
%	Porcentaje	pl	Punto Isoeléctrico
pH	Potencial de hidrógeno	D.E.	Desviación Estándar
CRA	Capacidad de Retención de Agua	C.V.	Coefficiente de variación
a_w	Actividad de agua	R.H.	Rehidratación
µm	Micrómetro	ADP	Adenosín difosfato
nm	Nanómetro	M_t	Humedad del solido
cm	Centímetro	M_e	Humedad del solido en equilibrio
ATP	Adenosín trifosfato	M_o	Humedad inicial
AOAC	Association Of Official Agricultural Chemists	SAGARPA	Secretaria de Agricultura, ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación
UIM	Unidad de Investigación multidisciplinaria	CIE	Commission Internationale de l'Eclairage

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
ÍNDICE DE CUADROS.....	14
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1.- MARCO TEÓRICO.....	17
<i>1.1 Carne.....</i>	<i>17</i>
1.1.1 Estructura de la carne.....	18
1.1.1.1 Tejido conectivo.....	20
1.1.1.2 Tejido epitelial.....	21
1.1.1.3 Tejido nervioso.....	21
1.1.1.4 Proteínas miofibrilares.....	21
1.1.1.4.1 Miosina.....	22
1.1.1.4.2 Actina.....	23
1.1.1.4.3 Actomiosina.....	24
1.1.1.4.4 proteínas sarcoplásmicas.....	24
1.1.2 Transformaciones bioquímicas.....	25
1.1.2.1 Post-mortem.....	27
1.1.2.2 Rigor mortis.....	27
1.1.2.3 Resolución o maduración.....	28
1.1.3 Carne de Pavo.....	29
1.1.3.1 Composición química.....	30
1.1.3.2 Valor nutricional.....	31
1.1.3.3 Producción y consumo.....	32
1.1.4 Parámetros de calidad de la carne.....	32
1.1.4.1 pH.....	33
1.1.4.2 Capacidad de retención de agua (CRA).....	35
1.1.4.3 Color.....	40
1.1.4.4 Dureza.....	45
1.1.4.5 Actividad de agua.....	46
<i>1.2 Conservación de los alimentos.....</i>	<i>52</i>

1.2.1 Congelación	52
1.2.1.1 Afectación en lípidos	54
1.2.1.2 Afectación en proteínas	55
1.2.1.3 Transferencia de calor	56
1.2.1.3.1 Consideraciones	56
1.2.1.4 Ventajas.....	56
1.2.1.5 Desventajas	57
1.2.2 Liofilización.....	57
1.2.2.1 Proceso	58
1.2.2.2 Transferencia de calor y masa.....	60
1.2.2.2.1 Consideraciones	61
1.2.2.3 Partes de la liofilizadora	62
1.2.2.4 Ventajas.....	65
1.2.2.5 Desventajas	65
1.2.2.6 Aplicaciones.....	66
1.3 Rehidratación	66
1.3.1 Generalidades	66
1.3.2 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación.....	68
1.3.2.1 Factores extrínsecos.....	68
1.3.2.1.1 Pretratamiento al secado	68
1.3.2.1.2 Método de secado	69
1.3.2.1.3 Temperatura y velocidad de secado	69
1.3.2.1.4 Temperatura de almacenamiento	69
1.3.2.2 Factores intrínsecos	70
1.3.2.2.1 Líquido de rehidratación	70
1.3.2.2.2 La temperatura de la solución de rehidratación	70
1.3.2.2.3 Agitación durante la rehidratación	71
1.3.2.2.4 Características del producto	71
1.3.3 Transferencia de materia	71
1.3.4 Cambios microestructurales (Propiedades de hidratación de las proteínas)	74
1.3.5 Efecto de las sales	76
1.3.5.1 Pirofosfatos	78

1.3.5.1.1 Funciones	79
1.3.6 Modelo de rehidratación de Peleg.....	81
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	84
2.1 <i>Objetivo general</i>	84
2.2 <i>Objetivos particular</i>	84
2.3 <i>Hipótesis</i>	84
2.4 <i>Justificación</i>	84
2.5 <i>Condensado de la metodología experimental</i>	86
2.6 <i>Descripción de la metodología experimental</i>	87
2.6.1 Actividades preliminares.....	87
2.6.1.1 investigación bibliográfica.....	87
2.6.1.2 Reconocimiento de equipo	87
2.6.1.3 Rendimiento del pavo	87
2.6.1.4 Validaciones de termopares.....	87
2.6.2 Actividades experimentales	88
2.6.2.1 Actividad experimental 1. Obtención y corte de carne	88
2.6.2.2 Actividad experimental 2. Congelación.....	88
2.6.2.3 Actividad experimental 3. Liofilización.....	89
2.6.2.4 Actividad experimental 4. Rehidratación.....	89
2.6.3 Determinaciones	90
2.6.3.1 Potencial hidrógeno (pH)	90
2.6.3.2 Actividad de agua (aw)	91
2.6.3.3 Capacidad de retención de agua (C.R.A).....	91
2.6.3.4 Color	92
2.6.3.5 Resistencia a la deformación.....	93
2.6.4 Aplicación del modelo de Peleg	94
2.7 <i>Diseño experimental</i>	95
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
3.1 <i>Actividades preliminares</i>	96
3.1.1 Validación de termopares	96
3.1.2 Caracterización muestra fresca de pechuga de pavo	97
3.1.2.1 pH	97

3.1.2.2 Actividad de agua	98
3.1.2.3 Capacidad de retención de agua	98
3.1.2.4 Dureza	99
3.1.2.5 Color	99
3.1.3 Caracterización muestras liofilizadas rehidratadas con agua destilada.....	101
3.1.3.1 pH	101
3.1.3.2 Actividad de agua (<i>aw</i>)	102
3.1.3.3 CRA	102
3.1.3.4 Dureza	103
3.1.3.5 Color	104
3.1.3.6 Aplicación del modelo de Peleg	105
<i>3.2 Actividades experimentales de acuerdo al diseño experimental</i>	<i>107</i>
3.2.1 pH	107
3.2.2 Capacidad de retención de agua	109
3.2.3 Resistencia a la deformación.....	112
3.2.4 Actividad de agua	114
3.2.5 Color	116
3.2.6 Modelo de Peleg	122
3.2.6.1 Constantes de Peleg k_1 y k_2	123
3.2.6.2 Modelos predictivos.....	126
4. CONCLUSIONES.....	129
RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organización de la fibra muscular	19
Figura 2. Estructura de la miosina)	22
Figura 3. Representación de la molécula de F-actina	23
Figura 4. Representación de la molécula de mioglobina	25
Figura 5. Cambios bioquímicos en la transformación de musculo en carne.....	26
Figura 6. Efecto pH sobre CRA de la carne.....	37
Figura 7. Estructura del grupo hemo, de la hemoglobina	41
Figura 8. Mioglobina en forma de oximioglobina (izquierda) y metamioglobina	43
Figura 9. Distribución de colores sistema CIE Lab.....	44
Figura 10. aw y su relación con reacciones de deterioro	47
Figura 11. Isoterma de sorción	50
Figura 12. Isoterma de desorción y absorción	52
Figura 13. Etapas de la congelación	53
Figura 14. Etapas de la liofilización.....	58
Figura 15. Transición de la sublimación	59
Figura 16. Transferencia de masa durante liofilización	60
Figura 17. Partes del equipo liofilizador	63
Figura 18. Rehidratación de papaya a 4 temperaturas diferentes.....	70
Figura 19. Transferencia de masa durante la rehidratación	72
Figura 20. Curva rehidratación empleando el modelo Fick, Peleg y Weibull a diferentes temperaturas de rehidratación	73
Figura 21. Representación del porcentaje de hidratación en relación al pH y pl 75	
Figura 22. Estructura de las diferentes sales de sodio	80
Figura 23. Corte de pechuga de pavo	88
Figura 24. Ultracongelador REVCO modelo ULTIMA II	88
Figura 25. Liofilizadora freezone 4.5.....	89
Figura 26. Control de temperatura GENERAL DT4208SD.	89
Figura 27. Potenciómetro Oakton.....	90
Figura 28. Higrómetro de punto de rocío marca Decagon Devices modelo Pawkit	91
Figura 29. Centrífuga marca centurion mod K2015R	92
Figura 30. Espectrofotómetro de reflectancia, Konika minolta c/m 600.....	93
Figura 31. Penetrómetro, fruit pressure tester. Modelo FT327.....	94
Figura 32. Linealización de termopares	96
Figura 33. Grafica de ganancia de agua en muestras RH con agua destilada respecto al tiempo. 105	
Figura 34. Regresión potencial aplicada al grafico de las muestras rehidratadas con agua destilada partiendo del modelo de Peleg.....	106
Figura 35. Grafica de interacción pH	108
Figura 36. Grafica de interacción capacidad de retención de agua	110
Figura 37. Interacción Dureza	113
Figura 38. Interacción aw	115

Figura 39. Interacción color (L^*)	117
Figura 40. Interacción color (a^*)	119
Figura 41. Interacción color (b^*)	121
Figura 42. Linealización de acuerdo al modelo de Peleg	122
Figura 43. Interacción para la constante 2 según el modelo de Peleg.	124
Figura 44. Interacción para la constante 1 según el modelo de Peleg	125
Figura 45. Modelos predictivos para rehidratación de pechuga de pavo liofilizada	127

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química de la carne de pavo	30
Cuadro 2. Componentes del equipo liofilizador	64
Cuadro 3. Diseño experimental	95
Cuadro 4. Ecuaciones para la corrección de los termopares	97
Cuadro 5. Determinación de pH al pavo fresco.....	97
Cuadro 6. Determinación de a_w para pechuga de pavo fresco	98
Cuadro 7. Determinación de CRA para pechuga de pavo fresco	98
Cuadro 8. Determinación de Dureza para pechuga de pavo fresco.....	99
Cuadro 9. Determinación estímulos de color $L^*(A)$, a^* y $b^*(A)$	100
Cuadro 10. Determinación pH, muestras liofilizadas RH con agua destilada	101
Cuadro 11. Determinación de a_w , muestras liofilizadas RH con agua destilada	102
Cuadro 12. Determinación de porcentaje de CRA, muestras liofilizadas RH con agua destilada ...	102
Cuadro 13. Determinación de dureza. Muestras rehidratadas con agua destilada	103
Cuadro 14. Determinación del perfil de color. Muestras rehidratadas con agua destilada	104
Cuadro 15. Valores de las constantes k_1 y k_2 para muestras rehidratadas con agua destilada....	105
Cuadro 16. Valores de la regresión potencial para las muestras RH con agua destilada.....	106
Cuadro 17. Resultados de pH	107
Cuadro 18. Resultados del % CRA de pavo rehidratado.....	109
Cuadro 19. Resultados Dureza	112
Cuadro 20. Resultados de a_w de pechuga de pavo rehidratada	114
Cuadro 21. Resultados de los parámetros del perfil de color (L^* , a^* , b^*)	116
Cuadro 22. Constantes de la linealización del modelo de Peleg	123
Cuadro 23. Valores de la regresión potencial para aplicación de modelos predictivos.	128

RESUMEN

El objetivo de este proyecto consistió en evaluar el efecto que tienen las sales, específicamente el pirofosfato y tripolifosfato de sodio aplicados a la rehidratación de un producto liofilizado (pechuga de pavo), el impacto que tienen en los parámetros de calidad físicos (color, Dureza) y fisicoquímicos (pH, a_w , capacidad de retención de agua). En donde se empleó dos tamaños diferentes de muestras (1 y 2 cm^3), dos concentraciones diferentes (0.3 y 0.7%) para cada tipo de sal empleada en el proceso de rehidratación. Se realizó una cinética de rehidratación siguiendo el modelo de Peleg (donde se determinaron las constantes k_1 y k_2), para determinar el comportamiento para cada tratamiento y poder diseñar modelos predictivos a partir de la regresión potencial al modelo de Peleg para cada tratamiento. Los resultados fueron tratados estadísticamente mediante un diseño factorial 2^k con 3 réplicas y 3 repeticiones para cada tratamiento. Los resultados mostraron valores mayores tanto para pH, a_w , captación de agua en la cinética de rehidratación y valores menores respecto a dureza referente a la geometría de 1 cm^3 en comparación con la geometría de 2 cm^3 . La concentración de las sales de 0.7% en comparación con la de 0.3% mostró un aumento en los valores de pH, a_w , captación de agua en la cinética de rehidratación y capacidad de retención de agua, por lo que se comprobó que a medida que aumenta la concentración de las sales la proteína cambia sus propiedades internas de su propia estructura, aumentando su punto isoeléctrico (lo que se verificó a través del incremento del valor de pH) y como consecuencia aumentó las interacciones con el medio (agua) durante la rehidratación.

INTRODUCCIÓN

La conservación de productos biológicos o de sustancias destinadas a la alimentación de origen animal o vegetal, fueron y siguen siendo hoy un problema de difícil resolución. La extrema complejidad de estos productos y su alto grado de humedad, los hacen muy sensibles a las condiciones externas.

Un ejemplo de estos productos de origen animal, es la carne de pavo y sus productos derivados, los cuales han resultado una alternativa alimenticia a los productos obtenidos del ganado bovino y porcino, su bajo contenido en grasa (si se consume sin piel) y fácil digestibilidad convierten al pavo en un alimento apto y prometedor. La carne de pavo posee una alta cantidad de las vitaminas del grupo B y respecto a los micronutrientes, es una rica fuente de minerales, entre los que destacan; magnesio, zinc, potasio, fósforo y selenio (Lawrie, 1985). La producción de pavo en México ha tenido un incremento sustancial aproximadamente de 1000 toneladas en un periodo que va del 2010 al 2016 hasta alcanzar las 15,000 toneladas anuales (SAGARPA 2017), razón por la que se deben de implementar métodos eficientes que ayuden a conservar las propiedades nutricionales de la carne. En respuesta a estos métodos, la mejor solución es la eliminación total del agua contenida en el espécimen, ya que parte de las reacciones químicas relacionadas con la vida y con la degradación de sustratos, transcurren en solución acuosa, el reducir la actividad del agua las retarda hasta detenerlas. La desecación directa es impracticable por lo tanto se recurre a la criodesecación al vacío o liofilización, que no es más que la extracción de agua de un producto previamente congelado, en forma de vapor; es decir se produce el fenómeno denominado sublimación donde el hielo en estado sólido en condiciones de baja presión pasa a vapor sin pasar por el estado líquido intermedio, evitando la translocación de sales, creando una textura de panal y relativamente poco cambio histológico, evitando de esta manera, cambios relacionados con las estructuras de las proteínas cárnicas, mismas que determinan las propiedades funcionales relacionadas con su aptitud tecnológica y con los procesos de fabricación, así como con sus atributos de calidad, entre los que caben citar; la capacidad de hidratación, capacidad de retención de agua, dureza, color, pH, mismos parámetros que fueron determinados en este trabajo de investigación y que dan respuesta a los cambios implicados por la interacción de las diversas variables manipuladas. El secado por frío (liofilización), ha sido utilizado ampliamente para procesar los alimentos desde finales del siglo XIX. Secar en frío es un método eficaz para extender la vida media de los alimentos, teniendo en cuenta que impide el deterioro debido al crecimiento microbiano o por oxidaciones (Barbosa y Vega, 2000).

Los productos cárnicos liofilizados, que han sido adecuadamente envasados, se pueden almacenar por períodos sin límite, ya que conserva las propiedades de la mayoría de sus propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales como en el estado fresco.

Por otra parte, un producto cárnico liofilizado es consumido preferentemente rehidratado. La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales originales del material fresco (previo al secado o deshidratado) poniendo en contacto el producto seco con agua. Diversos investigadores han reconocido que el grado de rehidratación es dependiente de la composición original del producto, condiciones del proceso y preparación, así como de la extensión del desorden químico y estructural provocado por la liofilización o secado convencional (Harper y Tappel 1957; Lewicki, 1998a). No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida y Marinos 2005). Los factores internos y externos durante la rehidratación tienen una gran influencia sobre el estado final del producto rehidratado (Marabi 2004). Uno de los factores extrínsecos más importantes durante este fenómeno, es el empleo de una solución salina. Damodaran y Paraf (1982), indica que las sales que mejor estabilizan son las que promueven la hidratación de las proteínas y que se unen a ellas de forma débil. Por el contrario, las que se unen fuertemente a las proteínas desestabilizan porque no logran hidratarlas eficientemente. Por otra parte, un método para determinar el grado de rehidratación de un sistema proteico y fundamentarlo desde el punto de vista de la transferencia de masa es el modelo de Peleg, que involucra la difusividad y la capacidad de captación de agua por parte del sistema (Peleg 1988).

1.- MARCO TEÓRICO

1.1 Carne

De acuerdo a la NOM-194-SSA1-2004, refiere carne, a la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; proveniente de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas; se incluyen las refrigeradas o congeladas. Por otra parte, todo aquello que afecte la estructura muscular, fundamentalmente los procesos tecnológicos, se reflejara en las características del producto final. Por lo tanto, conocer detalladamente las macro y microestructuras del musculo y sus modificaciones

durante los diferentes procesos ayudara a comprender el comportamiento de la carne y de esta forma incidir para mejorar la calidad del producto final (Xia, Kong, Liu Q, Liu J., 2009).

La composición química de la carne está en función de factores intrínsecos y extrínsecos, pero la proteína es el componente más importante de la carne y en contenido ocupa el segundo lugar después del agua. De acuerdo con su procedencia las proteínas del músculo se clasifican en: sarcoplásmicas, miofibrilares y del tejido conectivo (Bandman, 1986). La carne roja magra contiene alrededor de 76 % de agua. El contenido de agua varía inversamente con el de grasa: si aumenta el contenido de grasa, el de agua decrece, aproximándose al contenido de agua del tejido adiposo, cercano al 10 %. La presencia del agua influye poderosamente en los cambios que ocurren en la carne durante la refrigeración, almacenamiento y procesamiento (Hamm, 1960). La proporción entre proteína y agua es casi constante en un amplio rango de contenido de grasa. El tejido adiposo es pobre en agua. Son las proteínas las principales sustancias captadoras de agua de los organismos vivos, por tanto, son de gran importancia las interacciones agua-proteína y proteína-proteína, determinantes del tamaño de los espacios del retículo proteico en los que se retienen las moléculas de agua.

1.1.1 Estructura de la carne

La estructura del músculo ha sido objeto de un intenso estudio durante muchos años. El conocimiento de la estructura del músculo es fundamental para entender las relaciones entre las propiedades del músculo y su empleo como carne. La función y situación de las proteínas relacionadas con la contracción (miosina, actina, tropomiosina y troponina) se conocen actualmente con bastante detalle. El tejido muscular se asocia con el movimiento y la posición del esqueleto y con la contracción en muchos órganos, incluyendo, por ejemplo, el sistema vascular. La proporción del músculo en las canales depende de la especie, edad, sexo, raza, plano de nutrición, etc.

Para comprender los cambios *post mortem* asociados a la conversión del músculo en carne, así como sus propiedades y utilidad, se debe estudiar la estructura, composición y funciones de la musculatura en el animal vivo.

Existen tres tipos de músculos: músculo estriado voluntario o esquelético; músculo estriado involuntario o cardíaco y músculo liso involuntario (Lawrie, 1985).

La unidad estructural, esencial de los músculos es la fibra muscular, que es una célula muy especializada. Las fibras musculares constituyen del 75 al 92 % del volumen total del músculo. Los tejidos conectivos, vasos sanguíneos, fibras nerviosas y el líquido extracelular constituyen el volumen restante, del que la mayor parte lo forma el líquido extracelular (Lawrie, 1974). Las fibras musculares son células multinucleadas, estrechas y largas que pueden extenderse de uno a otro extremo del músculo y alcanzar hasta una longitud de 34 cm a pesar de tener un diámetro que oscila entre 10 y 100 μm dentro de individuos de una misma especie y a veces dentro de un mismo músculo. En la Figura 1 se muestra la organización estructural de la fibra muscular.

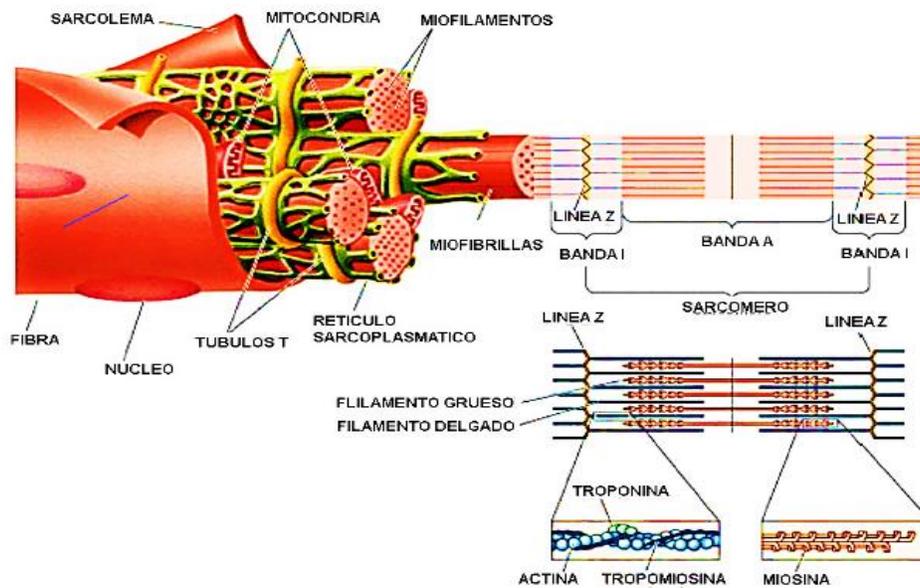


Figura 1. Organización de la fibra muscular ([Http://4.bp.blogspot.com/Bandas+Musculares.jpg](http://4.bp.blogspot.com/Bandas+Musculares.jpg))

La membrana que rodea la fibra muscular se llama sarcolema y está compuesta de material lipídico-proteico. El sarcolema, es una delicada membrana que se encuentra inmediatamente debajo del endomisio; es relativamente elástica y está muy relacionada con la contracción, relajación y estiramiento del músculo. La apariencia estriada característica de la fibra es debida a la presencia de series de delgadas unidades estriadas transversalmente conocidas como miofibrillas, que están embebidas en el citoplasma de las células, denominado sarcoplasma. A lo largo de la fibra muscular aparecen periódicamente invaginaciones del sarcolema que forman una red tubular llamado sistema T o túbulos transversos.

El sarcoplasma es la sustancia intracelular coloidal en la cual están suspendidos todos los orgánulos y está constituido por alrededor de 75 a 85% de agua. Además contiene lípidos, glucógeno, ribosomas, proteínas, compuestos nitrogenados no proteicos y constituyentes no orgánicos.

Cada fibra muscular contiene de varios centenares a varios millares de miofibrillas. Las miofibrillas son orgánulos únicos del tejido muscular, se extienden a lo largo de la fibra muscular y son las responsables del patrón estriado del músculo esquelético.

El sarcómero, la unidad básica estructural de la fibra muscular, es la región comprendida entre dos líneas Z adyacentes (Figura 1), y tiene una longitud aproximada en reposo de 2,5 μm . El sarcómero es la unidad básica del ciclo de contracción- relajación muscular.

La banda A del sarcómero está formada por los llamados filamentos gruesos, constituidos casi completamente de miosina. Estos filamentos se cree que mantienen su ordenamiento trasversal y longitudinal mediante gruesas bandas cruzadas, localizadas periódicamente a lo largo de su longitud, y especialmente por conexiones entre ellos que se alinean en el centro de la banda A.

1.1.1.1 Tejido conectivo

Como su nombre lo indica, el tejido conectivo conecta y sostiene varias partes del cuerpo. Representa más del 30 % de la proteína del músculo. El tejido conectivo está distribuido en el cuerpo como un componente del esqueleto, los órganos, la sangre y los vasos linfáticos, así como en las envolturas de los tendones, músculos, troncos nerviosos, fibras musculares y fibras nerviosas. La piel está unida al cuerpo por tejido conectivo. Este tejido también tiene la función en el cuerpo de actuar como una barrera protectora contra agentes infecciosos (Forrest *et al.*, 1975).

El tejido conectivo se caracteriza por tener relativamente pocas células y una considerable cantidad de sustancia extracelular. Esta sustancia extracelular tiene fibras embebidas en ella, que son los elementos estructurales del tejido conectivo. Es decir, que el tejido conectivo consiste en una masa sin estructura, llamada sustancia fundamental amorfa, donde están embebidas las células y fibras extracelulares.

1.1.1.2 Tejido epitelial

Si bien el tejido epitelial es el tejido que menos contribuye a la carne desde el punto de vista cuantitativo, su aporte a las características sensoriales de la misma resulta particularmente importante, por sus propiedades y las de su subyacente tejido conectivo. Mucho del tejido epitelial que queda en la carne está asociado con los vasos sanguíneos y linfáticos, al igual que en órganos comestibles como el riñón y el hígado. Las células del tejido epitelial se adhieren apretadamente unas a otras y se caracterizan por tener poco material intracelular (Prince y Schweigert, 1986). Se clasifican de acuerdo a la forma de la célula y al número de capas que forman el epitelio. Mantienen el contacto intercelular y forman láminas celulares cohesivas que recubren superficies y cavidades (Forrest *et al.*, 2012).

1.1.1.3 Tejido nervioso

El tejido nervioso constituye una proporción pequeña de la carne (< 1 %) pero tiene una función relevante en el período antes y durante el aturdimiento y desangre del animal, por lo que influye en la calidad de la carne. El tejido nervioso incluye el sistema nervioso central y el periférico. La neurona es la célula fundamental de la mayoría del tejido nervioso y consta de un cuerpo de forma poliédrica y una estructura cilíndrica alargada llamada axón, que frecuentemente se llama axoplasma. Las fibras nerviosas están compuestas de grupos de axones neuronales y la unión de grupos de fibras dentro de los fascículos forma los troncos nerviosos. Los fascículos de las fibras nerviosas se mantienen unidos por láminas de tejido conectivo y el mismo tronco nervioso está envuelto por una cubierta de tejido conectivo.

1.1.1.4 Proteínas miofibrilares

Las proteínas estructurales de las miofibrillas del músculo esquelético están clasificadas en tres categorías: contráctiles, reguladoras y del citoesqueleto. Las propiedades de estas proteínas son de significativa importancia en los atributos de la calidad de la carne *post mortem*, están muy relacionadas con el *rigor mortis*, la textura y la capacidad de retención de agua de las piezas de carne (Lusby *et al.*, 1983). Estas proteínas imparten al músculo rigidez estructural y son decisivas en la transformación de energía química en mecánica durante la contracción. Constituyen alrededor del 10 % de la proteína de la carne y son solubles en soluciones salinas concentradas.

1.1.1.4.1 Miosina

Es la más abundante de las proteínas miofibrilares; representa cerca del 55 a 60 % de las proteínas totales, y constituye el 35 % de todas las proteínas del tejido muscular (Yates y Greaser, 1983). Posee una carga eléctrica elevada y tiene gran afinidad por los iones calcio y magnesio. En la Figura 2 se observa la estructura de esta proteína.

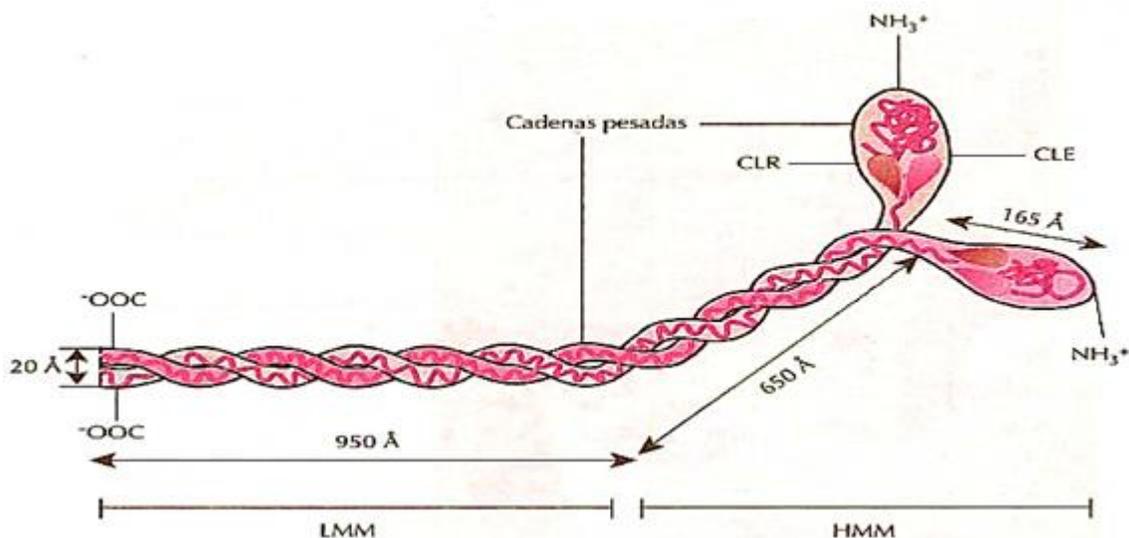


Figura 2. Estructura de la miosina (www.arteria.iespana.es)

La estructura de la miosina es de una varilla alargada, llamada región de la cola, con una porción gruesa al final, llamada región de la cabeza. Cada una de las cadenas se enrolla en una conformación alfa-helicoidal en la mayor parte de su longitud excepto en su extremo NH₂ terminal donde forma la cabeza, de estructura globular (Bailey, 1982).

La actividad enzimática de la miosina se caracteriza porque presenta dos valores óptimos de pH: 6,0 y 9,5. En la molécula de la miosina se encuentran cerca de 500 restos de 20 aminoácidos, entre ellos todos los esenciales. La miosina de tipo 2 contiene dos cadenas pesadas, con una longitud aproximada de 2000 aminoácidos, y constituyen la cabeza y la cola del filamento de miosina. La molécula de miosina permanece unida al filamento de actina, durante el desplazamiento, por una de sus cabezas. Cerca del 30 % de todos los aminoácidos pertenecen a ácidos dicarboxílicos, lo cual le da un carácter ácido a la molécula. Es por esta razón que su punto isoeléctrico está en la zona ácida de la escala de pH (5,4).

1.1.1.4.2 Actina

La actina es el principal constituyente de los filamentos delgados. El punto isoeléctrico se encuentra aproximadamente en un valor de 4.7, encontrándose, al igual que la miosina, en la zona ácida.

Es una proteína globular constituida por una cadena polipeptídica simple que une una molécula de nucleótido (ATP o ADP) y un catión divalente (calcio o magnesio) por monómero (Pollard y Weihing, 1974). Esta proteína constituye aproximadamente el 22 % del total de las proteínas musculares y es rica en el aminoácido prolina. Este aminoácido, por las características de su grupo amino (=N-H), contribuye a la forma plegable entre las cadenas polipeptídicas de las moléculas globulares de actina (G-actina). La actina puede existir en dos formas: G actina y la F-actina (se muestra en la Figura 3), la primera consiste en unidades globulares relativamente pequeñas que tienen un peso molecular de aproximadamente 47 kilodaltons y está compuesta de una sola cadena polipeptídica; tiene alto contenido de prolina, de ahí su baja proporción de alfa-hélice.

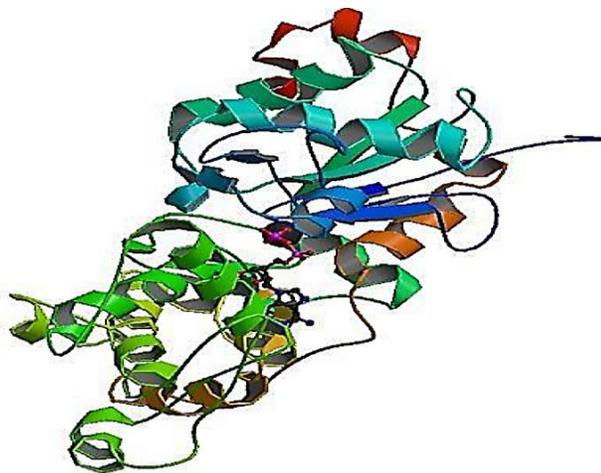


Figura 3. Representación de la molécula de F-actina ([http://www.rcsb.org/pdb/home\(2ZW\)](http://www.rcsb.org/pdb/home(2ZW)),2013)

La F-actina tiene una estructura filamentosa interpretable como una hélice, estando cada actina rodeada de otras cuatro, es fibrosa, con un peso molecular mayor que 14 megadaltons, y consiste en dos hebras de actina- G monómeros dispuestas en una ordenación súper enrollada. Un filamento constituido por dos de tales hebras tendría un diámetro de 60 Å (Bandman y Shelton 1983).

1.1.1.4.3 Actomiosina

Es un complejo de dos proteínas: la actina y la miosina. Se forma cuando ocurre la contracción muscular en el músculo vivo o en pre-rigor y, cuando ocurre el *rigor mortis*. Cada filamento de actina-F puede enlazar numerosas moléculas de miosina. El complejo actomiosínico se disocia en presencia de ATP y de Mg^{2+} . Constituye la mayor parte de las proteínas fibrilares que se encuentran en el músculo *post mortem* y la rigidez que se origina después de la muerte del animal (*rigor mortis*) se debe en gran parte a este complejo. La formación de la actomiosina da lugar a un estado de rigidez y de relativa inextensibilidad muscular (Bandman y Shelton 1983).

1.1.1.4.4 proteínas sarcoplásmicas

Este grupo de proteínas incluye muchas enzimas solubles involucradas en el metabolismo anaeróbico, las enzimas mitocondriales del ciclo de los ácidos tricarboxílicos y los de la cadena transportadora de electrones y juegan un papel muy importante en los cambios que se producen tras la muerte durante su transformación en carne. Las proteasas y pigmentos musculares influyen notablemente en la calidad de la carne durante la fase *post mortem* y su procesamiento ulterior

- **Mioglobina**

Es una proteína conjugada que tiene un grupo prostético de naturaleza no peptídica, responsable del color rojo del músculo, sirve para almacenar el Oxígeno en la fibra para luego ser utilizado en el metabolismo aeróbico, y un grupo proteico llamado globina. La mioglobina y la hemoglobina son los compuestos que le proporcionan el color rojo a la carne. La mioglobina es la principal responsable del color de la carne, ya que por lo general el contenido total de pigmentos de ésta se compone de aproximadamente un 95 % de mioglobina y 5 % de hemoglobina (Warris y Rhode 1977).

El color de la carne está determinado esencialmente por dos niveles de oxidación del átomo de hierro del grupo hemo. En forma ferrosa reducida Fe^{2+} o férrica oxidada Fe^{3+} . Cuando el hierro ferroso del grupo hemo carece del sexto ligante, el pigmento es llamado *desoximioglobina*, y es de color púrpura. Esa variante de la mioglobina, en presencia de oxígeno se convierte en *oximioglobina*, ocupando el O_2 la sexta posición del Fe^{2+} y es responsable de la apariencia rojo cereza o brillante de la carne fresca. Esta reacción se favorece con altas presiones parciales de oxígeno (mayores que 40 mm de Hg). Las dos formas reducidas de mioglobina se oxidan a presiones parciales de O_2 entre 1 y 1,4 mm de Hg: el Fe^{2+} pasa a Fe^{3+} , formándose *metamioglobina* de color marrón, en la que el agua ocupa la sexta posición de coordinación (Andújar, Pérez y Venegas 2003).

La Figura 4 muestra la conformación helicoidal de la cadena polipeptídica en la mioglobina donde Alrededor del 78% de la estructura secundaria tiene una conformación de hélice alfa.

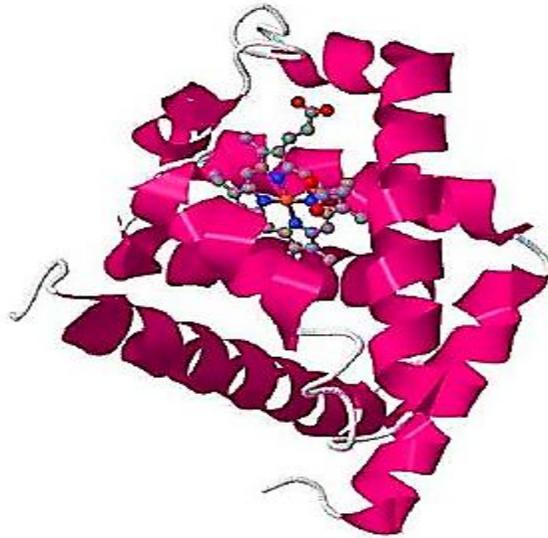


Figura 4. Representación de la molécula de mioglobina (<http://www.rcsb.org/pdb/home>, 2013)

En su estructura puede apreciarse que está formado por un átomo de hierro y un gran anillo planar, *la porfirina*, que está compuesto por 4 anillos pirrólicos heterocíclicos, unidos entre sí por puentes etenos. El ciclo del color en las carnes frescas es reversible y dinámico permitiendo una constante interconversión de las tres formas de pigmentos: mioglobina, oximioglobina y metamioglobina.

1.1.2 Transformaciones bioquímicas

El proceso posterior a la muerte del animal de abasto lleva a la transformación gradual del tejido muscular en carne y es de vital importancia conocer todos los cambios que ocurre, este proceso se puede dividir en 3 etapas importantes: *post-mortem*, *rigor mortis* y resolución, en los cuales ocurren diversos procesos bioquímicos y físico-químicos (Fenemma y Damodaran, 2010).

El músculo no se convierte en carne repentinamente al detenerse sus funciones. Esta conversión implica una serie de cambios continuos en el metabolismo de las células musculares así como en la estructura de sus proteínas, que se producen en un periodo de varias horas o aun de días y se caracterizan por una disminución del pH, el agotamiento del ATP, el decrecimiento de la temperatura del músculo, el establecimiento de la rigidez cadavérica o *rigor mortis* (Morzel *et al.*,

1988). En la Figura 5 se muestra la representación esquemática de la transformación de músculo a carne.

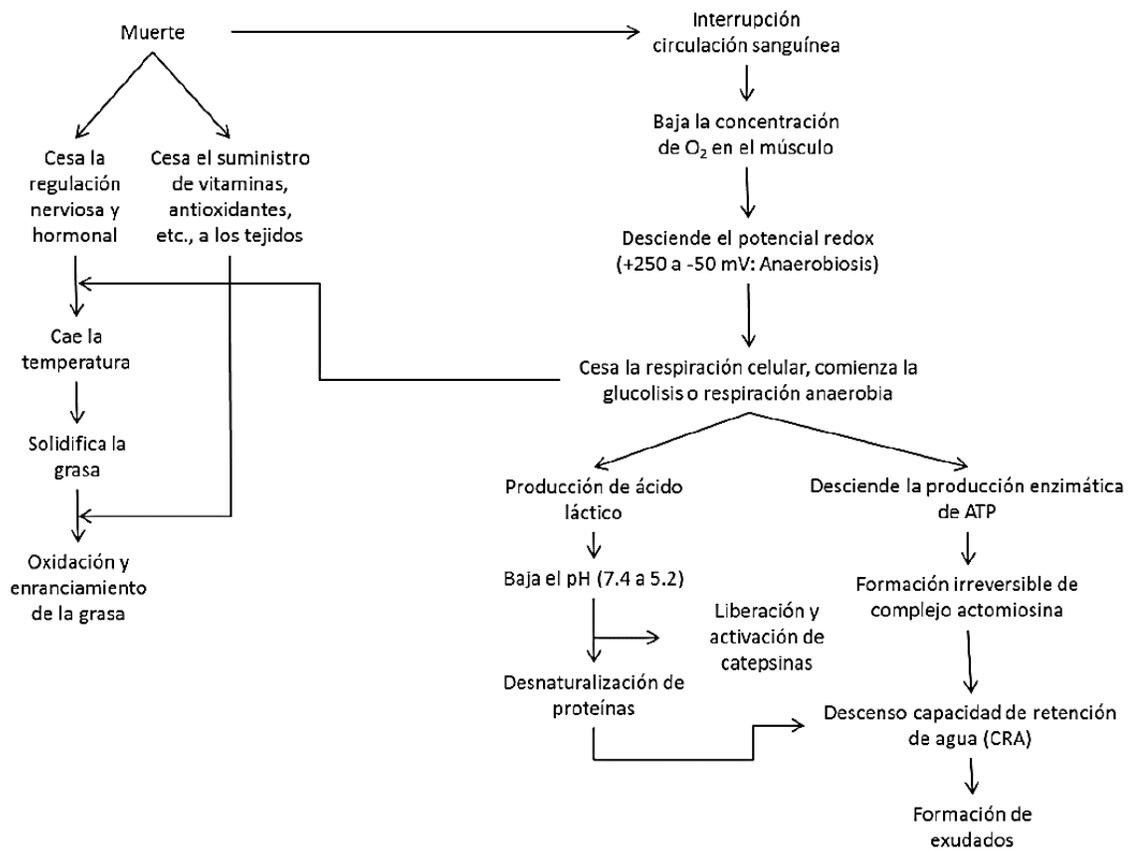


Figura 5. Cambios bioquímicos en la transformación de músculo en carne (Fenemma, 2010)

La conversión de músculo a carne se inicia con la muerte del animal. Después del proceso de desangre del animal, las células entran en un estado donde no reciben más nutrientes para su funcionamiento normal, por lo que comienzan a realizar procesos de supervivencia. En la segunda fase, se da la conversión de músculo a carne.

Cuando el animal es desangrado se genera una interrupción no solo en la circulación sanguínea, sino también el aporte de oxígeno al músculo, iniciando así la síntesis anaeróbica de energía, llamada glucólisis. A medida que se gasta las reservas glucogénicas se da una acumulación de ácido láctico (producto final del metabolismo anaeróbico), el pH post-mortem disminuye y esta caída inactiva las enzimas glucolíticas, hasta llegar a un complejo rígido llamado *Actomiosina*, que en última instancia es lo que se denomina músculo en rigor.

1.1.2.1 Post-mortem

El mayor cambio que experimenta el músculo una vez ha cesado la vida tiene que ver con la síntesis energética. La interrupción de la circulación sanguínea priva al músculo del aporte de oxígeno, la respiración celular se paraliza y surge la síntesis anaeróbica de energía, igual a la que se presenta en vida cuando el animal atraviesa por estados anóxicos, sólo que en la condición *post mortem* no existe el torrente sanguíneo para la eliminación de los productos de esa síntesis en el músculo y su reconversión en el hígado. El sistema de síntesis energético, tan eficiente en vida a través de la glucólisis aeróbica, ciclo de los ácidos tricarboxílicos (que se ocurre en las mitocondrias) y el sistema de citocromos - coenzimas de la respiración-, con una producción neta de 36 moles de ATP por cada una de glucosa separada del glucógeno, pasa a ser una síntesis energética deficiente y limitada donde por cada molécula de glucosa separada del glucógeno, se producen 2 moles de ATP.

En algunos animales el pH puede descender muy poco en la primera hora después del sacrificio, permaneciendo en un valor relativamente alto, dando lugar a un pH final mayor de 6.5. En otros casos es posible un descenso muy rápido del pH de la carne, sin que la canal haya perdido calor, es decir, encontrándose aún a temperatura alta, causando desnaturalización de la proteína, pérdida de la solubilidad y de capacidad de retención de agua, reflejándose en la carne en una coloración más pálida, una textura más abierta y con un corte húmedo, lo que se conoce como carne PSE (*pale, soft, exudative*) (pálida, suave y exudativa) (Price y Schweigert 1986).

En general el tiempo de descenso normal del pH *post mortem* depende de la especie, para pollos transcurre entre dos a cuatro horas, 10 a 24 horas para el músculo bovino y hasta 50 horas para el músculo de ballena, dependiendo además de la temperatura a la cual transcurra la glucólisis, si ésta es alta, la glucólisis transcurrirá más rápidamente que si la temperatura es baja, en razón a que las reacciones incrementan su velocidad con la temperatura.

1.1.2.2 Rigor mortis

En un músculo normal e intacto el *rigor mortis* presenta, entre otras, dos facetas principales: el acortamiento y la rigidez, que lo endurecen y hacen menos elástico y flexible. El acortamiento de los sarcómeros se origina por la formación de enlaces cruzados entre los filamentos finos y los gruesos y crea un estado de tensión continua en las fibras musculares que produce la rigidez característica del músculo. La magnitud de este acortamiento se puede determinar midiendo la

disminución de la longitud de un músculo u observando los cambios de longitud del sarcómero con un microscopio o por medio de una técnica con láser (Hamm, 1986).

En la medida que transcurre la glucólisis *post-mortem* llega un momento, más tarde o más temprano, de acuerdo con las condiciones premortales, en que la síntesis energética se detiene, bien sea por efecto del pH o por agotamiento del glucógeno. En ausencia o a muy bajas concentraciones de ATP, la actina y la miosina se unen en forma irreversible formando el complejo actomiosina, produciendo la rigidez cadavérica y haciendo los músculos inextensibles. El proceso es similar al de la contracción muscular en vida, sólo que en esta situación es irreversible en condiciones naturales.

Una vez la concentración de Ca^{2+} en el fluido sarcoplásmico retorna a su nivel bajo, por acción del retículo sarcoplásmico a través de sus túbulos que recogen el exceso de Ca^{2+} en el sarcoplasma y los une en forma inactiva para ser almacenados en la cisterna, las moléculas de troponina liberan el Ca^{2+} que han ligado y de nuevo son hábiles para inhibir la formación de actomiosina, produciéndose así la relajación muscular.

A medida que desciende el ATP se observa una rápida pérdida de extensibilidad muscular, pero el punto al que se produce esta inextensibilidad es bastante variable. A esta inextensibilidad muscular es a lo que se le denomina rigidez cadavérica y es que, en la medida en que los músculos se contraen, se genera una serie de fuerzas de acción y reacción que conllevan al fenómeno global de cadáver rígido.

1.1.2.3 Resolución o maduración

Al proceso natural mediante el cual se termina la rigidez cadavérica, haciéndose la carne más tierna y aromática se le denomina resolución o maduración. A este proceso están asociados muchos cambios químicos y bioquímicos: la disociación de la actomiosina, el rompimiento del sarcómero por desintegración de la línea Z, proteólisis, aumento del pH y de la capacidad de retención de humedad asociados a la reorganización intramolecular de las proteínas determinando cambios en la carga eléctrica, y aumento de la presión osmótica.

A medida que la carne envejece, su dureza disminuye; se aumenta la extracción de las proteínas miofibrilares con soluciones salinas, aumentando su capacidad de retención de agua. Para algunos investigadores la maduración no parece ser el resultado de una disociación de los enlaces

establecidos entre la actina y la miosina, es decir, el rigor no se "resuelve", sino que se produce la separación de los filamentos de actina de la línea Z bajo la influencia de modificaciones iónicas o enzimáticas. La proteólisis que ocurre a nivel de las proteínas sarcoplasmáticas produce una liberación de iones Ca^{2+} y una captación de iones K^+ y Na^+ , los cuales ayudan a incrementar la capacidad de retención de humedad, cambiando al mismo tiempo las cargas iónicas produciendo un incremento en el pH de valores de 5.3 a 5.7 hasta 6.0 (Forrest *et al.*, 2012).

Las proteínas estructurales predominantemente modificadas durante la maduración son la desmina y la troponina T y, en menor medida, la conectina (titina), la troponina I y la proteína C (Penny, 1980). Debido a los cambios *post-mortem* las propiedades de membrana de las células se ven alteradas y el tejido es susceptible a degradación autolítica por acción de enzimas proteasas endógenas que debilitan la estructura miofibrilar, entre las que destacan las calpaínas, calpastatinas, catepsinas, serinproteasas, miosinasas y enzimas exógenas. El tejido muscular recupera gradualmente cierta elasticidad debido a la pérdida de su integridad mejorando la textura.

Goll *et al.* (1983) Concluyeron, adecuadamente, que la escasa degradación de miosina y actina que ocurre en el músculo *post-mortem* era indicativa de que la mayor parte de la proteólisis estructural durante la maduración debería deberse a una proteasa neutra con escasa actividad sobre estas proteínas, llamada en aquel momento factor activado por calcio (calcium activated factor: CAF) o factor sarcoplásmico activado por calcio (calcium activated sarcoplasmic factor: CASF) (Lawrie, 1985). Otros autores reconocieron que se trataba realmente de un complejo enzimático, y recibió otros nombres, como proteinasas neutras activadas por calcio (calcium activated neutral proteinases: CANP).

1.1.3 Carne de Pavo

El pavo es un ave doméstica que se sitúa en la escala zoológica dentro del orden *Galliformes*, familia *Meleagridae*, género *Meleagris*, especie gallopavo. Son originarios de América del Norte. Presentando la cabeza con una piel desnuda, roja pálida, con variaciones azuladas, recubierta de verrugas y carúnculas de color rojo. Los pavos domésticos descienden de la primera raza originaria de México, de donde se llevaron a España, pasando luego a casi toda Europa. Siendo las principales razas domésticas: Blanco de Holanda; Narragansett; Raza negra; Ardesia; rojo Borbón; Blanca de Beltsville y Bronceada gigante (Barioglio, 2004).

Existen 6 razas de pavos domésticos: *Meleagrisgallopavomerriami*, *Meleagrisgallopavo intermedia*, *Meleagrisgallopavoosceole*, *Meleagrisgallopavosilvestris*, *Meleagrisgallopavo onusta* y *Meleagrisgallopavomexicano*. En la actualidad podemos encontrar de manera comercial y más comúnmente los híbridos de *Meleagrisgallopavo*.

1.1.3.1 Composición química

La carne de pavo es una carne magra, con menor concentración de grasa (Cuadro 1) y de colesterol incluso que el pollo, especialmente cuando se consume sin piel, donde reside una parte importante de la misma.

Cuadro 1. Composición química de la carne de pavo

Composición química carne de pavo	
Humedad	55-65%
Proteínas	30-35%
Grasa	5-10%
Carbohidratos	2-7%
Cenizas	2-3%

Fuente: http://www.mapama.gob.es/ministerio/biblioteca/revistas/pdf_MG

Tiene como componente mayoritario, en un 65% aproximadamente, al agua, le siguen las proteínas con alto valor biológico, dado su contenido en aminoácidos esenciales

La composición química de la carne pueden variar sus proporciones en función de múltiples factores; mientras algunos de estos pueden ser intrínsecos al animal del que provienen (especie, raza, alimentación, edad, etc.), existen otros factores más bien asociados a los procesos a que se someten los animales, ya sea antes (tiempo de ayuno, de transporte, estrés, método de insensibilización, etc.) o después de su faenado (sistemas de refrigeración, congelado, carga microbiana, enriquecimientos por la adición de marinados, etc.). Estos cambios en la composición de la carne, son relevantes ya que influyen en su calidad tecnológica, higiénica, sanitaria y sensorial. En términos generales, se puede decir que la carne fresca contiene de un 70 a 75% de agua, 20 a 22

% de proteínas, 1 a 5 % de grasa, 1% de sustancias minerales y menos de 1 % de hidratos de carbono (Sañudo *et al.*, 1999).

Del músculo fresco, el 80% lo componen compuestos no nitrogenados (90% agua; 7% lípidos; 1% minerales; 1% carbohidratos y menos del 1% vitaminas). El 20% que representan los compuestos nitrogenados, está formado por un 90% de proteínas y un 10% de compuestos no proteicos. De las proteínas, el 60% lo comprometen las miofibrilares (principalmente miosina, actina y titina), 29% sarcoplásmicas; 6% proteínas del estroma (de las cuales el colágeno abarca el 95%) y un 5% de proteínas granulares. Así, la composición química del cuerpo, está formada por un 73% de oxígeno; 14% de carbono, 10% de hidrógeno y 3% de nitrógeno.

1.1.3.2 Valor nutricional

Aunque el músculo del animal vivo contiene una pequeña cantidad de hidratos de carbono en forma de glucógeno, éste se destruye en los procesos *post mortem* del ave, de forma que la carne de pavo no contiene hidratos de carbono. Con respecto a los micronutrientes el pavo es fuente de minerales entre los que destacan magnesio, zinc, potasio, fósforo y selenio.

Sin embargo, el contenido de hierro en esta carne, aunque de alta biodisponibilidad; es cuantitativamente bajo si lo comparamos con la media del grupo, no alcanzando 1 mg por 100g de alimento. Las principales vitaminas presentes son del grupo B, destacando la niacina, B6, B12. Contiene pequeñas cantidades de ácido fólico y tan sólo trazas de vitaminas liposolubles.

Su bajo contenido en grasa (si se consume sin piel) y fácil digestibilidad convierten al pavo en un alimento apto y prometedor para muchas dietas terapéuticas, para cualquier tipo de dieta de adelgazamiento o alimentación dirigida a ancianos y niños. Las actuales recomendaciones nutricionales, aconsejan el consumo de 3 a 4 raciones a la semana de carnes magras, alternando el consumo entre distintos tipos, entre los que está, sin duda, el pavo.

La carne de pavo, si corresponde a animales jóvenes, es tierna y fina. Aunque alcanzan enormes pesos, no tienden al engrasamiento; razón de preferencia de carne. Los pavos pueden pesar hasta 25kg, con siete clases distintas de carne, mostrando diferencias de color y consistencia según la región corporal. Las extremidades tienen una carne relativamente ordinaria y oscura, mientras que la carne de la pechuga es más tierna y de color pálido (Farchmin, 1967).

La carne de pavo tiene poca cantidad de las vitaminas liposolubles como A, D, E, K; pero mucha cantidad de las vitaminas del grupo B (B1, B2, B6, B12) (Lawrie, 1985). La mayor parte de las vitaminas es relativamente resistente a los procesos tecnológicos aplicados en la industria cárnica. Sin embargo, la tiamina se destruye parcialmente durante los procesos de salazón, ahumado, horneado, secado y mediante el tratamiento con calor y con radiaciones ionizantes.

1.1.3.3 Producción y consumo

En la actualidad, la producción industrial de pavos no habla de variedades, si no de híbridos comerciales, que no son más que el producto de dos o más líneas diferentes, dando resultado a lo que se conoce como vigor híbrido. Todos conocidos como pavos de doble pechuga. La producción de estos pavos, además de los controles zoonosanitarios en el proceso productivo para el establecimiento en el mercado nacional, procesan las aves en plantas TIF, que cuentan con altos niveles de equipamiento y tecnificación, con estrictos procesos de higiene y calidad, que van desde la recepción de las aves, hasta el empaquetamiento y conservación de las canales y piezas obtenidas (Ezequiel *et al.*, 1983).

El consumo de esta carne se divide en dos grupos; el consumo directo (pechugas, cortes de pechuga, muslos y piernas que pueden ser ahumadas) y el de carnes industrializadas (carnes frías, embutidos y enlatados).

La producción de carne de pavo entre 2000 y 2015 creció 0.4% de 5.1 a 5.3 millones de toneladas. El total de producción mundial para 2009 fue de 5.5 millones de toneladas que las previsiones para 2011 y 2012 que fueron de 5.7 millones de toneladas. El número de pavos sacrificados en todo el mundo en 2009 fue más de 656 millones, lo que representó una reducción de 34 millones (5%) sobre 2008 de casi 691 millones. Del total del 2009, 380.6 millones (58%) fueron sacrificados en América y 212 millones (32%) en Europa. En el año 2000, el peso promedio global de la canal de pavo era alrededor de 7.6 kg. Para el 2009, la media aumentó a 8.1kg y actualmente su peso se encuentra por encima de los 11 kg, lo que contribuye a que el número de pavos sacrificados disminuyera considerablemente (FAO, 2014).

1.1.4 Parámetros de calidad de la carne

El sistema agroalimentario y sus diferentes cadenas constituyen la base económica por excelencia de nuestra región. La producción de pavos y sus industrias asociadas tienen un importante impacto

sobre el desarrollo regional. La necesidad de obtener productos de calidad es un reto que se impone en las industrias cárnicas. Estas buscan una estandarización de sus productos para lo cual es fundamental el control de calidad sobre la materia prima y productos.

1.1.4.1 pH

El pH de la carne, que en el momento de la faena se encuentra en 7.2 y desciende en las horas posteriores a valores por debajo de 5.8, influye fundamentalmente sobre la capacidad de fijación de agua de la actomiosina. En la fabricación de productos cárnicos cocidos, las fibras musculares pueden quedar intactas, es decir, como un sistema de captación de agua limitado por la membrana celular o sarcolema, como es el caso del jamón cocido, o bien pueden quedar como un sistema miofibrilar desintegrado a causa de la destrucción del sarcolema, con lo que se libera el complejo de actomiosina (caso de las pastas finas); en este último caso, la acción de los aniones cloruros y fosfatos provoca un aumento adicional de la CRA de la carne. Situación favorable cuando se trata de productos emulsificados, en razón de sus características sensoriales.

El pH del músculo en vivo está cerca de la neutralidad. Después de la muerte desciende más o menos rápidamente, para alcanzar después de la rigidez cadavérica valores entre 5.4 y 5.8, (en condiciones normales y dependiendo de la especie) principalmente, debido a la degradación del glucógeno a ácido láctico, una reacción en la que el músculo trata de producir energía en ausencia de oxígeno. Esta reacción, depende importantemente de la actividad de una serie de enzimas que son sensibles a la temperatura, por lo que es relevante considerar la temperatura del músculo al momento de hacer la medición del pH.

Los microorganismos son extremadamente sensibles a las variaciones del pH y generalmente cuando este es bajo, suele producirse un descenso en la velocidad del crecimiento microbiano. Las más afectadas son las bacterias, luego las levaduras y los más resistentes a pH bajos son los mohos. Teniendo en cuenta lo anterior, significa que las carnes con valores de pH elevados están más expuestas a las acciones microbianas, sobre todo a la putrefacción. La mayoría de las bacterias crecen a valores de pH entre 5 y 8 (Price y Schweigert 1976).

Uno de los principales parámetros como indicadores de calidad es el pH, ya que en función de este puede determinarse o asociarse la calidad de la carne, carnes con defecto suelen asociar un pH más próximo a la neutralidad. Por otra parte en sistemas cárnicos, el pH puede estar asociado con otros

parámetros de calidad por ejemplo en la capacidad de retención de agua, a pH alejado de 5.5 se muestra una mejora en la CRA, con el color se relaciona de manera que influye en la oxidación-reducción de la mioglobina. Respecto a la dureza, Varios autores (Stickland, 1983) han identificado al pH muscular como un factor importante que influye en este parámetro. El grado de metabolismo *post mortem* (medido por el pH) conforme se altera la temperatura, tiene un efecto significativo en la dureza.

En cuanto al pH de los productos cárnicos, en los embutidos crudos picados se añaden azúcares como sustrato para que determinados microorganismos acidófilos produzcan un deseable descenso del pH, adecuado para la estabilidad del producto frente a otros microorganismos de carácter patógeno o alterativo. La fijación de agua se encuentra en el nivel más bajo a un pH de 5.0 a 5.2 (punto isoeléctrico de la actomiosina). La escasa fijación de agua y grasa de parte de la carne fría, se debe más que a la pérdida de ATP, al descenso del pH. Sin embargo, durante el almacenamiento de la carne se produce un incremento del pH en las etapas finales cuando el crecimiento de microorganismos proteolíticos produce una degradación de las proteínas y la consecuente liberación de compuestos nitrogenados (Hoffmann, 1977).

Las moléculas proteicas tienden a replegarse de forma que los grupos eléctricamente cargados y los grupos polares queden expuestos en la superficie molecular, en contacto con el agua. La estructura primaria de la miosina y la tropomiosina se caracteriza por un alto contenido en aminoácidos ácidos y básicos, que confieren una carga eléctrica fuerte a las moléculas. La unión de moléculas de agua a estas proteínas está dominada por interacciones grupo cargado dipolo. La molécula proteica nativa tiende a ser la más hidrófila.

Las miofibrillas retienen agua debido a que forman un retículo tridimensional de filamentos y la cantidad de agua inmovilizada depende del espacio existente entre filamentos, lo que se pone de manifiesto observando el efecto del pH sobre la capacidad de retención de agua (CRA). Cuando se añade agua a muestras de carne a las que se les ha ajustado el pH entre 4,5 y 7, se aprecia un mínimo de CRA a pH entre 5,0 y 5,1, 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 (Grau, 1971). Las proteínas tienen un máximo de grupos cargados en su superficie y por tanto su hidrofilia es máxima también.

El reducido efecto del pH refleja el alto grado de entrecruzamiento de los filamentos, que contrarresta la repulsión electrostática que se da al aumentar el pH. La maduración de la carne conlleva una desintegración de la estructura miofibrilar en la banda I (Pearson *et al.*, 1974).

El aumento de la fuerza iónica favorece la solubilización de las proteínas, lo que incrementa el poder emulsificante. En realidad existe una relación crítica entre el pH y la fuerza iónica en la formación de la emulsión, ya que los iones mejoran la capacidad de emulsión debido a que favorecen el desdoblamiento de las moléculas, incrementándose de este modo el área efectiva como membrana interfásica. La influencia del pH se debe, entre otras causas, a que cerca del punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares, la solubilidad desciende notablemente, por lo que disminuye la aptitud para la formación de emulsiones. Además, como la carga eléctrica de las proteínas en este estado es igual a cero, no pueden contribuir a la estabilidad electrostática de las partículas. Por otra parte en el punto isoeléctrico, la proteína se repliega y no tiene la suficiente elasticidad para favorecer la emulsión.

La disposición espacial de las cargas positivas y negativas convierte a la molécula de agua en un dipolo que se orienta activamente en presencia de cargas eléctricas de ambos signos. Las moléculas proteicas tienden a replegarse de forma que los grupos eléctricamente cargados, y los grupos polares queden expuestos en la superficie molecular, en contacto con el agua. La estructura primaria de la miosina y la tropomiosina se caracteriza por un alto contenido en aminoácidos ácidos y básicos, que confieren una carga eléctrica fuerte a las moléculas. La unión de moléculas de agua a estas proteínas está dominada por interacciones grupo cargado dipolo. La molécula proteica nativa tiende a ser la más hidrófila.

1.1.4.2 Capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención de agua se puede definir como la aptitud de la carne para mantener ligada su propia agua, incluso bajo la influencia de fuerzas externas (presión, calor, etc.), o también como la aptitud para fijar agua añadida (Swatland, 1991).

La CRA es un parámetro físico-químico importante por su contribución a la calidad de la carne (fue asociada ya por Wierbicki (1963) y la de sus productos derivados. La CRA de la carne está relacionada con la textura, ternura y color de la carne cruda y jugosidad y firmeza de la carne cocinada. Dicha retención de agua se produce a nivel de las cadenas de actino-miosina.

Damodaran y Konsella (1982), indica que las sales que mejor estabilizan son las que promueven la hidratación de las proteínas y que se unen a ellas de forma débil. Por el contrario, las que se unen fuertemente a las proteínas desestabilizan porque no logran hidratarlas eficientemente. El mecanismo involucra la capacidad de las sales para promover el ordenamiento de las moléculas del agua que no está íntimamente ligada a la matriz de las proteínas sino al agua que se encuentra en el seno del líquido rodeando a la proteína, aumentando o disminuyendo la CRA.

En la transformación de carne vacuna a productos cárnicos, la CRA no solo depende del pH de la carne, sino, sobre todo, de la aparición del rigor mortis. Las propiedades de hidratación constituyen, entre las propiedades funcionales, un grupo de gran importancia desde el punto de vista tecnológico. Estas propiedades dependen fundamentalmente de la interacción agua-proteína, y también están determinadas por variables tales como la naturaleza de la proteína o las condiciones físico-químicas del medio. Muchas de las propiedades sensoriales de la carne como son el color, la textura y la firmeza, están relacionadas con la cantidad de agua que se tiene contenida o retenida en la carne. Nutricionalmente, una baja CRA resulta en pérdidas importantes de agua, que acarrearán, proteínas, minerales y vitaminas hidrosolubles. Desde el punto de vista industrial, la capacidad de una carne para retener el agua originalmente contenida, así como el agua que se añada durante los procesos industriales, por ejemplo durante el marinado o la inyección, influye en la eficiencia del sistema y dicta en parte el rendimiento final del producto. Una pobre retención de agua, provoca un goteo constante que interfiere en los sistemas de empaque, así como en los sistemas de salazón en seco. La CRA influye en el aspecto de la carne antes de la cocción y en la sensación de jugosidad durante la masticación. Por eso es importante conocer las características de una carne en cuanto a su CRA. Para darle un uso adecuado ya sea en elaboración de productos emulsificados (jugosos) o productos secos o semisecos, productos de pasta gruesa, entre otros.

El número de puentes de rigor entre filamentos depende del grado de contracción de las fibras musculares. Si las fibras están extendidas de modo que los filamentos se solapan poco, el número de puentes de rigor es bajo y la diferencia en la capacidad de retención de agua antes y después del rigor entonces será pequeña.

En el músculo contraído, el efecto del rigor es considerable. La carne contraída tiene la más baja CRA y el efecto del pH es menor que para la carne extendida. El reducido efecto del pH refleja el alto grado de entrecruzamiento de los filamentos, que contrarresta la repulsión electrostática que se da al aumentar el pH. La maduración de la carne conlleva una desintegración de la estructura

miofibrilar en la banda I (Pearson et al., 1974), este fenómeno se ve afectado por la adición de aditivos que aumenten significativamente el pH, causando una mayor interacción de las proteínas con el agua que la rodea y mejorando de esta manera la capacidad de retención de agua a medida que esta se aleja de su punto isoeléctrico (ver Figura 6).

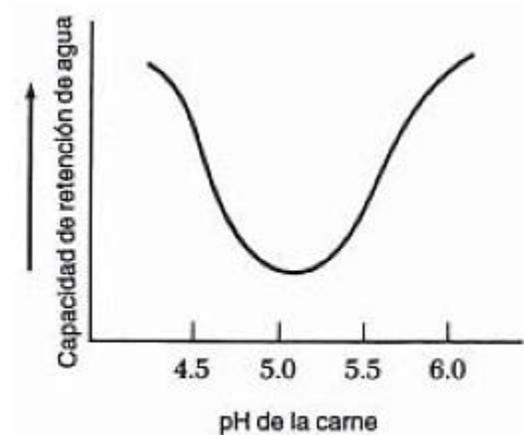


Figura 6. Efecto pH sobre CRA de la carne (Lawrie 1985)

La capacidad de retención de agua de la carne está íntimamente ligada con el efecto que tiene el pH a medida que se desplaza por abajo a por encima de su punto isoeléctrico, que para el caso de la carne madurada este valor se encuentra entre 5 - 5.2 , por lo que a medida que el pH se aleje de este valor, la capacidad de retención de agua aumentara (Lawrie 1985).

La variación en la CRA de la carne en la canal también se ve afectada por la velocidad de enfriamiento tras el sacrificio y la posición de la carne en relación con la superficie de la canal. La declinación del pH de los músculos más profundos es más rápida que la de los superficiales y están expuestos a pH por debajo de 6,0 mientras la temperatura todavía está por encima de 30 °C (Wisner-Pedersen, 1986).

Como ya se ha comentado anteriormente el pH es un factor importante ligado a la CRA, presentando una correlación de 0,927 (Thomsen, 1988). El incremento en la CRA en el intervalo de medida del pH desde 5,40 a 5,85 corresponde claramente con la curvatura pH-CRA señalada por Hamm (1960). El punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares se alcanza a un pH de 5.0. En este punto existe un máximo de enlaces iónicos entre las proteínas, por lo que la matriz proteica está contraída. Un efecto análogo sucede en el lado ácido cuando se incrementan las cargas eléctricas positivas. La

formación de puentes de hidrogeno alrededor de las proteínas, promueve la estabilización de estas macromoléculas. En contraste, las sales que desnaturalizan a las proteínas rompen la estructuración del agua ligada convirtiéndola en un mejor solvente para las moléculas apolares, mejorando la capacidad de retención de agua.

Por otra parte, el NaCl ejerce un importante efecto modificador sobre la capacidad de retención de agua (CRA) de la carne. Algunas de las relaciones más interesantes del agua se ponen de manifiesto en el curado por inmersión de la carne en una salmuera: al comienzo del curado, el agua y las proteínas solubles de la carne fluyen hacia la salmuera del exterior, debido a la mayor presión osmótica de la salmuera. Más tarde, el flujo invierte su sentido, ya que el cloruro que difunde hacia el interior de la carne forma un complejo con las proteínas cárnicas, que provoca un aumento de la presión osmótica en el interior del producto, por encima del nivel en la salmuera.

La sal, que permite el hinchamiento de la proteína cárnica y que en parte provoca la solubilización de la misma, mejora la capacidad de retención de agua por el hinchamiento de las partículas de la carne. El efecto de las sales es un ejemplo típico de la influencia de la carga eléctrica de las proteínas en la capacidad de retención de agua de la carne. A valores de pH por encima del punto isoeléctrico, el cloruro de sodio a baja concentración, incrementa notablemente la capacidad de retención de agua, mientras que a valores de concentración alta sucede lo contrario. Honikel, (1988) afirma que los iones Cl^- , por encima del punto isoeléctrico debilitan las uniones entre los grupos de signo contrario de las cadenas proteicas y llegan a interactuar con los grupos cargados positivamente. Esto lleva consigo un aumento de la carga eléctrica negativa de las moléculas que se repelen entre sí, por lo que la estructura proteica se relaja y se aumenta la CRA. A valores de pH por debajo del punto isoeléctrico, los iones Cl^- neutralizan las cargas positivas de las proteínas de manera que, al disminuir la repulsión entre ellas, se produce una contracción de la estructura proteica que origina una pérdida de la CRA. Esta es la razón por la cual la sal puede ser usada para deshidratar una carne, como es el caso de productos secos, semisecos madurados (de humedad intermedia) o en productos emulsificados para mejorar CRA. y facilitar el proceso de emulsificación mediante la solubilización de las proteínas.

Los fosfatos por su parte incrementan notablemente la CRA de la carne. Este efecto se mha fundamentado en diversos factores, entre ellos, la variación del pH, la fuerza iónica, la capacidad secuestrante y su interacción con las proteínas. Además, los fosfatos pueden tener comportamiento diferente si se encuentran solos en la carne o en presencia de cloruro de sodio. Actualmente se

admite que el efecto de los fosfatos está basado, más que todo, en su interacción con las proteínas miofibrilares.

La adición de monofosfatos y polifosfatos a la carne con bajos valores de pH, produce un cambio del punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares, análogo al observado cuando se incorpora NaCl, lo cual quiere decir que los fosfatos reducen la CRA de la carne en un intervalo de pH ácido por debajo del punto isoeléctrico. Este fenómeno parece indicar que, como en el caso del NaCl, los aniones fosfatos interaccionan con la proteína miofibrilar en los mismos lados que los filamentos de miosina se unen con los de actina. De acuerdo con estos razonamientos, es posible que el incremento de la CRA producido por los fosfatos incorporados al músculo, en la fase de rigor y posrigor, sea debido a la disociación del complejo actomiosina que origina una relajación de la matriz proteica. Parece ser también, que los fosfatos solubilizan las proteínas miofibrilares, las cuales, al salir de la matriz proteica, incrementan notablemente su CRA (Flores y Bermell, 1984).

Estos mismos autores coinciden al reportar que dado que la CRA. se facilita por los puentes de Hidrógeno que se forman entre grupos polares no ionizables y el agua, todo factor disociante de los puentes iónicos o intercadena, la incrementa (como sucede con los polifosfatos que captan iones Ca^{++} responsable de los puentes iónicos intercadena).

Huidobro y Tejada (1993) afirman que las proteínas en las fibras musculares hinchadas y la miosina solubilizada tienen una gran habilidad de retener agua porque, los sitios reactivos de las proteínas están expuestos al solvente, en lugar de ser usados para las interacciones proteína-proteína. La miosina contiene 38% de aminoácidos polares con un gran contenido de ácido aspártico y glutámico, los cuales pueden atar de 6 a 7 moléculas de agua cada uno. El salado adicional incrementa la CRA de la miosina por aumento de la carga neta negativa efectiva y del vínculo iónico, lo que propicia una hinchazón molecular y aumento de interacción con moléculas de agua.

Como otra consecuencia de la asociación de iones a las moléculas de proteína, se experimenta un aumento de la capacidad de retención de agua de la carne, que se debe al desplazamiento del punto isoeléctrico de las proteínas a valores inferiores al normal, que es aproximadamente 5,4. Así, a cualquier valor de pH mayor que el punto isoeléctrico, la capacidad de retención de agua de la carne tratada con sal, será mayor que la de la carne fresca. Como en el proceso de curado se trabaja siempre a valores de pH por encima del punto isoeléctrico de las proteínas de la carne fresca, se

obtiene una retención de agua incrementada con la adición de sal. Este aspecto es esencial en la elaboración de productos curados.

El efecto neto en la solubilidad de las proteínas dependerá de la naturaleza de la proteína y de la sal utilizada, obteniéndose una solubilización o "*salting-in*" cuando la presencia de los iones ayuda a la disolución de la molécula, o bien, de "*salting-out*", cuando se precipitan otro tipo de proteínas. Las sales de iones divalentes como $MgCl_2$ y $(NH_4)_2SO_4$. Estos cambios en la solubilización afectan al agua que se denomina "inmovilizada" y no tienen ninguna relación con el "agua de constitución" (fuertemente ligada a grupos específicos de la molécula o ubicada en regiones intersticiales) ni tampoco con el "agua de interfase".

Son muchos los autores que han tratado de determinar detalles del mecanismo de la Interacción proteína-agua y del número de moléculas de agua unidas a cada molécula de proteína. Con el fin de predecir las propiedades de captación de agua de una proteína, deben conocerse las propiedades de captación de cada sitio. Al respecto, Chou y Morr (1979) afirman que cada grupo polar de una molécula de proteína capta una molécula de agua con excepción de los grupos de la glutamina y la asparagina.

Las proteínas están rodeadas de capas de agua a manera de un caparazón. Este es el agua más íntimamente ligada a las moléculas de proteína y consta de pocas moléculas (menos de 100) de agua por molécula de proteína, que están fuertemente ligadas en zonas hidrofílicas específicas. Tanto estas capas como las anteriores, constituyen el agua no congelable. Además rodeando estas capas, existen varias más (Borderías y Montero, 1988).

No obstante, si se empleara sólo sal químicamente pura en el curado, se obtendría un producto de aspecto gris, con color como de carne cocinada y un áspero sabor salado, que no sería muy aceptado por el consumidor. En general, se considera que el 70% del contenido de agua está ubicado en los espacios existentes entre los filamentos gruesos y delgados de la miofibrilla. Del resto, el 20% se encuentra en el sarcoplasma y el 10% en el tejido conectivo y espacios extracelulares.

1.1.4.3 Color

El color es un factor determinante dentro de los parámetros de calidad, ya que a nivel comercial, el comprador asocia el color con el grado de frescura, en el caso de carne de pavo, puede apreciarse una carne fresca de color rosado. El color rosado de la carne es el resultado de floración, que es el

cambio de color asociado con la oxigenación de la mioglobina. La oxidación y la desnaturalización de la mioglobina que determina la capacidad de la mioglobina para oxigenar de manera reversible, el oxígeno disponible, la disponibilidad de equivalentes reductores, y el pH en el tejido (Bendall y Swatland , 1988). Bajo pH altera la solubilidad del oxígeno el aumento de la profundidad de la difusión de oxígeno que aumenta el grado de floración (Ledward, 1992).

La mioglobina es la principal responsable del color de la carne, ya que por lo general el contenido total de pigmentos de ésta se compone de aproximadamente un 95 % de mioglobina y 5 % de hemoglobina. La cantidad de hemoglobina presente en la carne depende del grado de sangramiento del animal. La mioglobina, que tiene un peso molecular de 66 kilodaltons, está formada por una proteína y un grupo prostético cromático, llamado hemo. El grupo hemo (Figura 7), es el componente de los hemopigmentos que en realidad proporciona el color y tanto en la mioglobina como en la hemoglobina posee la misma composición química.

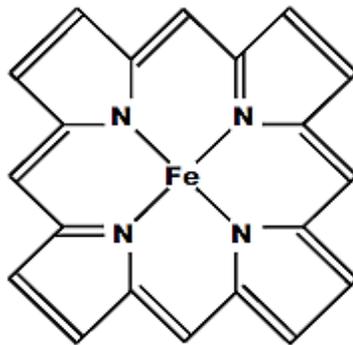


Figura 7. Estructura del grupo hemo, de la hemoglobina (Bedolla 2004)

El grupo *hemo* (grupo prostético) se halla encajado en la oquedad superior de la proteína globular, manteniéndose unido a la proteína por el enlace tipo van der Waals entre el átomo de hierro (Fe) y los nitrógenos imidazólicos. Este átomo sobresale del plano del grupo hemo hacia el aminoácido histidina. La cantidad de grupos hemos en una proteína puede determinar la función de esta, por ejemplo, la mioglobina es similar a la hemoglobina salvo que se trata de una proteína monoméricas; y, en consecuencia, solo tiene un grupo hemo. Las funciones de la hemoglobina y mioglobina es el transporte de oxígeno (O₂) en la sangre y en el músculo respectivamente (Bedolla 2004).

El contenido de mioglobina en la carne depende de diferentes factores. Un factor importante es la absorción del hierro con los alimentos. El color de la carne de ternera es blanco si se ceba con leche o con piensos proteicos pobres en hierro. Durante la alimentación con forrajes (verde, heno, etc.) el músculo absorbe crecientes cantidades de hierro, lo que favorece la formación de mioglobina (Potthast, 1987). La formación de mioglobina se incrementa con la edad y cuando el esfuerzo del músculo es mayor. Los músculos más rojos son aquellos responsables del desarrollo de procesos dinámicos y por ello disponen de un metabolismo oxidante intenso, con el necesariamente alto contenido de mioglobina; mientras que en los músculos blancos se encuentra menos mioglobina debido a que están sometidos a un esfuerzo menor (Lawrie, 1985).

La variación del color de la carne tiene influencia sobre la disposición industrial final de la misma, y ésta a su vez está determinada por factores como especie, edad, procedencia anatómica etc, que tienen que ver con el contenido de mioglobina de la carne. El grupo hemo es el componente de los hemopigmentos que en realidad proporciona el color y tanto en la mioglobina como en la hemoglobina posee la misma composición química.

El color de la carne se mide habitualmente por reflectancia usando uno de los dos grandes enfoques. Colorímetros usan filtros colocado entre una fuente de luz y una muestra que refleja de manera que una cantidad conocida de energía pasa a través del filtro y se refleja posteriormente de la muestra de nuevo a un detector en el instrumento. Espectrofotómetros utilizan la luz refractada para medir la energía en todo el espectro de la luz.

Al realizar la determinación de color en el músculo, el parámetro de L^* se correlaciona con el estado físico de la carne, debido al pH final del músculo, a la estructura de las fibras musculares y a la cinética implicada para establecer el *rigor mortis*; mientras que el tono es determinado por el estado químico del pigmento de mayor concentración en la carne, la mioglobina (Mb, de color rojo púrpura; oximioglobina, MbO₂, de color rojo vivo; metamioglobina, MetMb, de color pardo). El tono en la carne fresca está relacionada con los factores *post-mortem*, mientras que el croma, se relaciona más con la concentración de mioglobina, que influye directamente en la saturación del color del músculo y se relaciona principalmente con los factores *ante-mortem* (tipo de músculo, edad, alimentación, genética, etc.). Cuando la disponibilidad de oxígeno es alta, la desoximioglobina se transforma a oximioglobina dando un color rojo brillante en la carne (Figura 8). Por el contrario, si la tensión de oxígeno es baja, ocurre una reacción de oxidación y se forma metamioglobina dando a la carne un

color marrón. Las reacciones mencionadas son reversibles y están en relación con la presión parcial de oxígeno, la penetración de oxígeno en el músculo y la tasa de consumo de oxígeno.



Figura 8. *Mioglobina en forma de oximioglobina (izquierda) y metamioglobina (SAGARPA 2011)*

Metamioglobina se forma por exposición prolongada de la oximioglobina al oxígeno o directamente desde la mioglobina reducida cuando las presiones de oxígeno son bajas, siendo de color marrón-pardo. Cuando hay presencia de metamioglobina en más del 20% en la superficie, dos de cada tres consumidores rechazan la carne. Este fenómeno de color se observa en carne que ha sido almacenada por un periodo largo en presencia del oxígeno, por ejemplo en un anaquel expuesto al oxígeno en el supermercado.

La oximioglobina se forma cuando la deoximioglobina se pone en contacto con el aire, oxigenando al pigmento, esta característica se observa en la superficie de la carne fresca; tiene un color rojo brillante y es el color deseado por el consumidor. Este tipo de color se observa quince minutos después de sacar la carne de un empaque al vacío. A lo largo del procesamiento y comercialización de la carne, ésta se puede llegar a oxidar a rojo púrpura y luego a café rojizo por oxidación paulatina de la oximioglobina (Díaz, 2001).

De acuerdo con la guía AMSA (2012) y National Pork Board (NPB) (2000), las mediciones de color en la carne cruda son afectadas por la nutrición del animal, la velocidad de enfriamiento de la canal, el tipo de músculo, la orientación de las fibras, el pH del músculo, el tiempo y la temperatura de almacenamiento *post mortem*, el tiempo de exposición del músculo al oxígeno, el grado y la distribución del marmoleo, la humedad y brillo de la superficie y la concentración de mioglobina. Por ello, es de gran importancia estandarizar tanto como sean posible las variables en la medición de color de las muestras a ser comparadas, por lo que la comisión internacional de iluminación ha

planteado un sistema de distribución de colores (ver Figura 9) como referencia que apoye los controles de calidad.

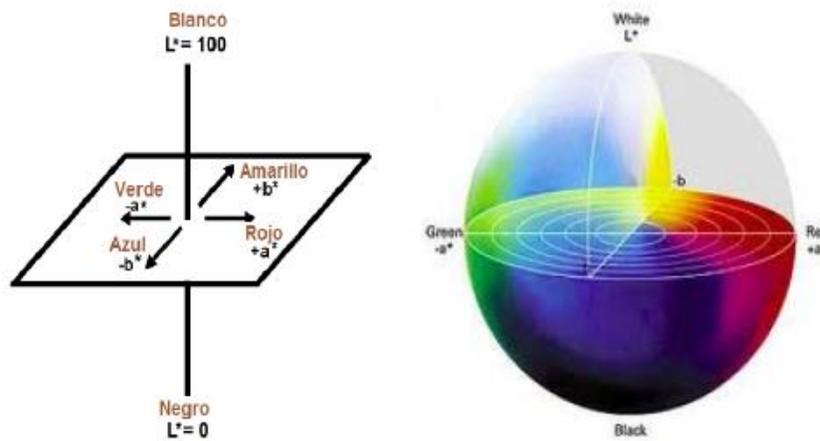


Figura 9. Distribución de colores sistema CIE Lab (García 2016)

Son tres los estímulos que determinan el color final de una muestra. El Tono también llamado Hue se refiere al nombre del color (amarillo, rojo, azul, verde, etc.), este resulta de la suma de estímulos generados en la retina, cuando recibe impulsos con diferentes longitudes de onda. Estos colores pueden tener diferente intensidad, pudiendo ser colores muy intensos o muy débiles en términos de Saturación de color, esto se denomina Croma. Finalmente, la Luminosidad nos indica que tan claro u oscuro es un color.

El espacio de color Hunter L, a, b se basa en un esquema de vectores que se representan de forma tridimensional, y que están basados en la teoría de los colores opuestos. La integran los parámetros L, a y b. L se refiere a la luminosidad y se ubica verticalmente, tomando valores de 100 (blanco) y 0 (negro); mientras que a y b, ubicados horizontalmente, no tienen límites, pero sí valores positivos o negativos. La escala de a se mueve de los valores positivos (rojo +) a los negativos (verde -); mientras que la escala de b va del amarillo (+) al azul (-). Todos los colores que se pueden percibir visualmente se pueden mostrar en este espacio rectangular de color. La CIE propuso una modificación a la escala original (Hunter L, a, b), al calcular de forma diferente los valores y paso a nombrarlos L*, a*, b* lo que ahora se conoce como el espacio de color CIE L*a*b*. Este espacio de color, es una transformación matemática de las coordenadas X, Y, Z. En ocasiones, algunos autores prefieren

expresar los valores, en términos de Luminosidad (L^*), Cromo o saturación (c^*) y Hue o tono (H^*), permite una descripción numérica del color de manera semejante al que los seres humanos comunican verbalmente el color en términos de luminosidad, tonalidad y saturación

1.1.4.4 Dureza

La dureza aparece como una percepción físico-química compleja y multidimensional (Kramer, 1973a). Se puede definir como la unión de las propiedades reológicas y de la estructura de un producto alimenticio perceptible por los receptores mecánicos, táctiles y eventualmente visuales y auditivos, condicionando la apetencia de un alimento.

Según la norma ISO 5492:2 la textura se define como “todos los atributos mecánicos, geométricos y superficiales de un producto, perceptibles por medio de receptores mecánicos, táctiles y, si es apropiado, visuales y auditivos” (Rosenthal, 1999).

La dureza, definida como la propiedad de la textura manifestada por una alta y persistente resistencia a la rotura en la masticación (Jowitt, 1974). La fuerza y la estabilidad de un producto cárnico dependen de las uniones entre las moléculas proteicas, tales como puentes de Hidrógeno y enlaces disulfuro y también de sus interacciones hidrofóbicas y electrostáticas. Múltiples factores pueden afectar la dureza, entre ellos el pH, la temperatura y diversas sales que aceleran o retardan el proceso en función de las características de sus iones, ya que modifican su estructura cuaternaria o la distribución de la carga de las moléculas de los polímeros, con lo que se altera la naturaleza y estructura de la carne, afectando las características del producto final.

La dureza de la carne es uno de los atributos más importantes de su calidad (Lawrie, 1985). Este atributo no es tan variable en la carne de cerdo, carnero o ternera, pero sí en la carne de vacuno. Los principales componentes de la carne que contribuyen a su ternura o dureza 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 (Smith *et al.*, 1978). El tejido conectivo y las fibras musculares influyen en la dureza de la carne de maneras totalmente diferentes. El tejido conectivo la afecta mediante un incremento lento y dependiente de la edad en la estabilidad de los puentes interfibrilares durante la vida del animal, mientras que las proteínas miofibrilares influyen por medio de un rápido acortamiento debido al incremento en el número y organización de los puentes de actomiosina después de la muerte del animal (Marsh y Leet, 1966).

Muchas de las variaciones que existen entre los músculos de un animal se deben a las diferencias en la proporción y naturaleza del tejido conectivo, principalmente el colágeno, aunque las fibras de elastina y reticulina presentes también pueden contribuir.

La cantidad de colágeno, principal componente del tejido conjuntivo, determina la llamada dureza de base, posee una alta fuerza de tensión y propiedades físicas (Bailey, 1982) que hacen que a una edad dada sea determinante su influencia, de forma que cuanto más importante es esta fracción más dura es la carne.

Las causas que dan lugar a la variación en la ternura de la carne son muy diversas, pero entre las más importantes se puede mencionar la especie, raza, sistema de producción, sistema de refrigeración y congelado, maduración de la carne, el acortamiento de los sarcómeros (estado de contracción muscular), cantidad y características del tejido conjuntivo, temperatura de cocción de la carne e inclusive el uso de sistemas de ablandamiento. Para el caso de carne cocinada, además de los anteriores, también es necesario considerar el método de cocción utilizado en su preparación. Cuando la carne es cocinada a altas temperaturas se genera endurecimiento; mientras que si la cocción es prolongada esto puede aumentar la suavidad si la carne presenta un alto contenido de colágeno, pues provoca la gelatinización del mismo

La medida instrumental de la dureza fue propuesta como una alternativa a la evaluación sensorial con el fin de superar los principales inconvenientes de esta, debido a la gran variabilidad en los resultados, la dificultad de la ejecución de las pruebas y a las peculiaridades de la interpretación de los resultados. Sin embargo, es necesario que las medidas obtenidas con métodos instrumentales, puedan correlacionarse con las respuestas de jueces de análisis sensorial, con el fin de validar la técnica instrumental utilizada (Anzaldúa, 1994).

1.1.4.5 Actividad de agua

Como parámetro de calidad es muy importante ya que indica el estado de la energía del agua en un sistema, que es la fracción del contenido de humedad total que está libre, y que en consecuencia está disponible para el crecimiento de microorganismos y para que se puedan producir diversas reacciones químicas que afectan a su estabilidad.

La actividad de agua, como parámetro de calidad, está relacionada directamente con el desarrollo de microorganismos. También está bien correlacionada con las reacciones de deterioro

físico y químico que acaban con la vida útil de los alimentos. Se puede utilizar para predecir y maximizar la vida útil, para tomar decisiones de envasado, evitar la transición vítrea y en otras muchas facetas de la formulación y diseño de nuevos productos.

A medida que la actividad de agua disminuye, la textura se endurece y el producto se seca más rápido. Por el contrario, los alimentos cuya actividad de agua es baja por naturaleza son más crujientes y se rompen con facilidad. En este caso, si la actividad de agua aumenta, se reblandecen y dan lugar a productos poco atractivos. En ambos casos, el parámetro de la actividad de agua del alimento es un factor determinante para la seguridad del mismo y permite determinar su capacidad de conservación junto con la capacidad de propagación de los microorganismos.

Labusa plantea el esquema de la Figura 10 donde representa las reacciones que se llevan a cabo a diferentes actividades de agua.

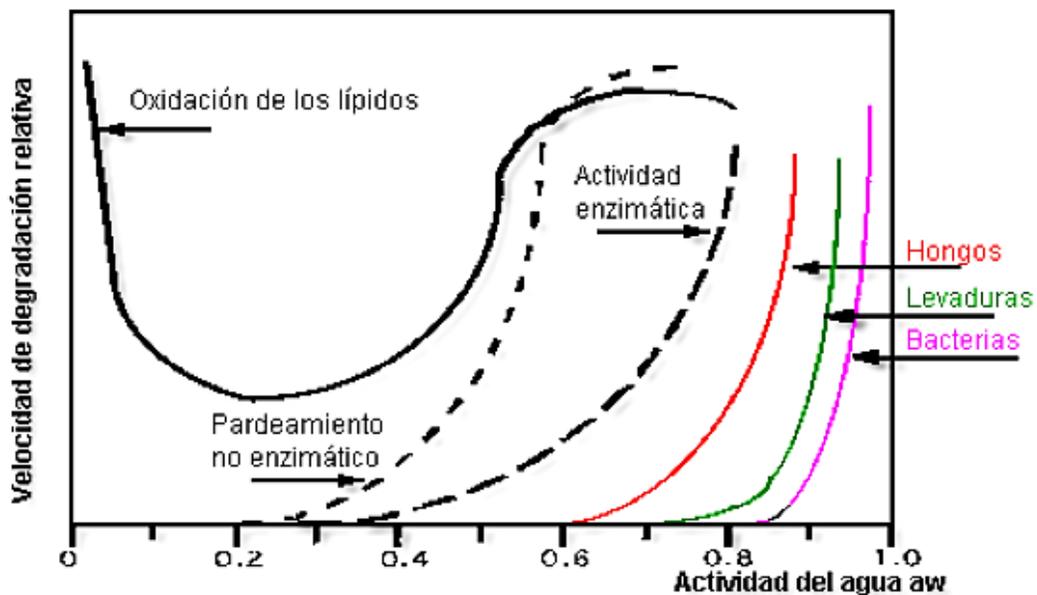


Figura 10. a_w y su relación con reacciones de deterioro (Labusa, 1970)

$a_w=0,98$: pueden crecer casi todos los microorganismos patógenos y dar lugar a alteraciones y toxiinfecciones alimentarias. Los alimentos más susceptibles son la carne o pescado fresco y frutas o verduras frescas, entre otros.

$a_w=0,93/0,98$: hay poca diferencia con el anterior. En alimentos con esta a_w pueden formarse un gran número de microorganismos patógenos. Los alimentos más susceptibles son los embutidos

fermentados o cocidos, quesos de corta maduración, carnes curadas enlatadas, productos cárnicos o pescado ligeramente salados o el pan, entre otros.

$a_w=0,85/0,93$: a medida que disminuye la a_w , también lo hace el número de patógenos que sobreviven. En este caso, como bacteria, solo crece *S. aureus*, que puede dar lugar a toxiinfección alimentaria. Sin embargo, los hongos aún pueden crecer. Como alimentos más destacados Figuran los embutidos curados y madurados, el jamón serrano o la leche condensada.

$a_w=0,60/0,85$: las bacterias ya no pueden crecer en este intervalo, si hay contaminación se debe a microorganismos muy resistentes a una baja actividad de agua, los denominados osmófilos o halófilos. Puede darse el caso en alimentos como los frutos secos, los cereales, mermeladas o quesos curados.

$a_w<0,60$: no hay crecimiento microbiano, pero sí puede haber microorganismos como residentes durante largos periodos de tiempo. Es el caso del chocolate, la miel, las galletas o los dulces.

La a_w mide la disponibilidad de agua del medio donde se encuentran los microorganismos, lo que es igual a la relación entre la presión de vapor de agua de la solución y la presión de vapor de agua del agua pura. El a_w de la carne fresca es de 0.98 - 0.99, cifras que son sumamente favorables para la multiplicación de todas las especies microbianas. Las variaciones en el a_w de la superficie de la carne (relacionada con la humedad relativa) tiene grandes repercusiones sobre el crecimiento microbiano superficial; todo descenso en el a_w , supone una desecación que se opone a la multiplicación microbiana. Podría pensarse entonces que debería descartarse la conservación de la carne en ambientes húmedos, sin embargo, el ambiente seco asociado con el frío, que provoca una buena inhibición microbiana, trae consigo problemas como pérdida de masa y por consiguiente pérdidas económicas (Price y Schweigert 1986).

La noción de «actividad» procede rigurosamente de las leyes de equilibrio termodinámico de G.N. Lewis, y en su aplicación a los alimentos. Aquí basta con afirmar que

$$a_w = \frac{f}{f_o} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde f , es la fugacidad del solvente de la solución (la fugacidad es la tendencia molecular de un solvente a escapar de una solución) y f_o es la fugacidad del solvente puro. A bajas presiones (por

ej., ambiente), la diferencia entre $\frac{f}{f_o}$ y $\frac{p}{p_o}$ es menor del 1%, por lo que la definición de la a_w en términos de $\frac{p}{p_o}$ es claramente justificable. Por tanto:

$$a_w = \frac{p}{p_o} \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta igualdad se basa en condiciones ideales (soluteo ideal en solución diluida) y de equilibrio termodinámico. Los alimentos suelen violar ambas condiciones. Consecuentemente, la Ecuación 2 debe tomarse como una aproximación, siendo más apropiada la expresión (3)

$$\frac{p}{p_o} = RVP \quad (\text{Ec. 3})$$

Debido a que $\frac{p}{p_o}$ es el parámetro medido y no siempre es igual a a_w , es más exacto usar el término $\frac{p}{p_o}$ que el de la a_w , como se hará en este capítulo. La «presión de vapor relativa» (RVP) es el nombre de $\frac{p}{p_o}$ y ambos términos se usarán intercambiamente. Aparte de la preferencia científicamente más exacta del uso de la RVP en lugar de la a_w , el Agua y hielo. En los productos cárnicos, el componente soluble que mayor efecto tiene sobre la a_w , es la sal, que se encuentra casi siempre completamente disuelta en el agua que también forma parte de ellos. Un producto cárnico puede concebirse, por tanto, como una matriz sólida embebida en una salmuera, cuya concentración prácticamente define la a_w , del sistema.

Un incremento cualquiera en el contenido de sal tiene un efecto mucho mayor sobre la actividad de agua que una variación equivalente en el contenido de agua. Esto, que es válido tanto para los valores medidos de a_w , como para los estimados, tiene como consecuencia, para los métodos de estimación a partir de los contenidos de sal y agua, que el dato del contenido de sal debe conocerse con la mayor exactitud posible, preferiblemente con una cercanía de $\pm 0,1 \%$.

Las isotermas de sorción de humedad (MSI) son representaciones gráficas de $\frac{p}{p_o}$ versus el contenido de agua (expresado como masa de agua por unidad de masa de materia seca) a la misma temperatura constante. La información obtenida con las MSI es útil: (a) en los procesos de concentración y deshidratación porque la RVP está relacionada con la facilidad o dificultad de eliminar agua, (b) para formular mezclas de alimentos evitando la migración de humedad entre los diversos ingredientes, (e) para determinar la impermeabilidad (propiedades barrera antigases)

requerida en el material de envasado, (d) para determinar el contenido de humedad que impide el crecimiento de los microorganismos de interés, y (e) para predecir la estabilidad química y física de los alimentos, en función del contenido de agua (Fennema 2010).

Para entender el significado y utilidad de las isoterma de sorción, a veces conviene dividirlos en zonas, como se indica en la Figura 11. A medida que se añade agua (resorción), la composición de la muestra se desplaza de la Zona I (seca) hacia la Zona III (de alta humedad), difiriendo significativamente las propiedades del agua de cada zona.

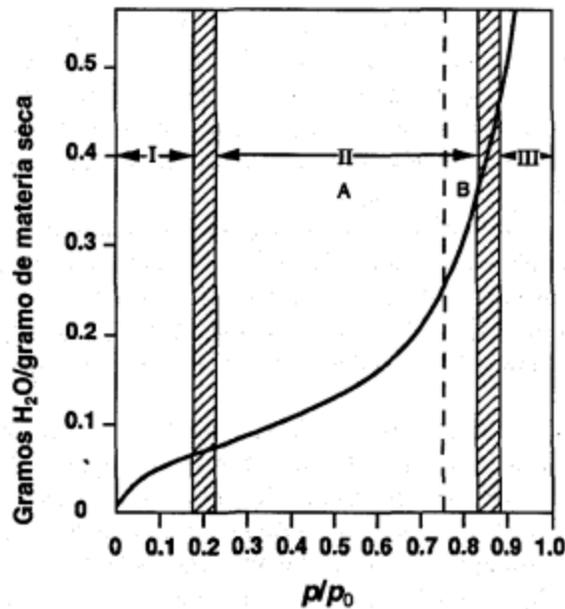


Figura 11. Isoterma de sorción (Fennema 2010).

El agua presente en la Zona I de la isoterma es la más fuertemente sorbida y la menos móvil. Esta agua se asocia con los grupos polares accesibles mediante interacciones agua ion o agua-dipolo, no congela a -40°C , carece de capacidad solvente y no está presente en cantidad suficiente como para ejercer un efecto plastificante sobre el sólido. Se comporta simplemente como parte integrante del sólido. El extremo más húmedo de la Zona I (límite entre las Zonas I y II) corresponde al contenido de humedad de la «monocapa BET» del alimento. El valor de la monocapa BET se aproxima a la cantidad de agua necesaria para formar una monocapa sobre los grupos altamente polares y accesibles de la materia seca. En el caso del almidón, esto supone una HOH por unidad de

anhidroglucosa. El agua de la Zona I constituye una fracción diminuta del agua total presente en un alimento de alta humedad.

El agua añadida en la Zona II ocupa los sitios de la primera capa que aún permanecen libres. Esta agua se asocia con las moléculas de agua vecinas y las moléculas de soluto fundamentalmente (primariamente) por enlaces de hidrógeno, es ligeramente menos móvil que el agua de la fase masiva y la mayoría no congela a -40°C . El agua añadida en la vecindad del extremo de baja humedad de la Zona II, ejerce una significativa acción plastificadora sobre los solutos, reduce sus temperaturas de transición vítrea y causa el hinchamiento incipiente de la matriz sólida. Esta acción, asociada con el comienzo de los procesos de solución, conduce a una aceleración en la velocidad de la mayoría de las reacciones.

El agua de las Zonas I y Zona II normalmente constituye menos del 5% del agua de un producto alimenticio rico en humedad. En la vecindad del límite de las Zonas II y III, el agua es suficiente para completar una cubierta de hidratación de monocapa verdadera, en tomo a macromoléculas tales como las proteínas globulares, siendo también suficiente para reducir la temperatura de transición vítrea de las macromoléculas hasta que se igualen la temperatura de la muestra y la T ambiente. La ulterior adición de agua (Zona III) causa una transición vítreo-elástica en muestras que contienen regiones vítreas, un descenso muy grande de la viscosidad y un gran aumento de la movilidad molecular, con el incremento correspondiente en las velocidades de muchas reacciones. Esta agua es congelable, tiene capacidad solvente y es fácilmente agua y hielo 57 utilizable por los microorganismos para su actividad biológica, crecimiento y multiplicación.

El agua de la Zona III es la denominada agua de la fase masiva. Si se añade más agua, ésta tendrá las propiedades del agua de la fase masiva y no alterará las propiedades de los solutos existentes.

La histéresis de sordón es más que una curiosidad de laboratorio. Labuza y Schmid 1985 han establecido taxativamente que la oxidación de los lípidos en las carnes de pollo o de cerdo, a valores p/p_0 en el intervalo de 0,75-0,84, ocurre más rápidamente si las muestras se han ajustado al valor p/p_0 deseado por desorción, en lugar de resorción. Las muestras de la desorción, como ya se ha dicho, contienen más agua a un p/p_0 dado que las muestras de resorción. Esto hace que la muestra rica en agua tenga menor viscosidad, lo que a su vez causará una mayor movilidad catalítica, mayor exposición de los sitios catalíticos debido al hinchamiento de la matriz y difusividad del oxígeno algo mayor que en la muestra de baja humedad (resorción). En otro estudio (Labuza y Riboh 1982)

hallaron que la p/p_0 necesaria para el cese del crecimiento de diversos microorganismos es significativamente inferior si el producto se ajusta por desorción en lugar de hacerlo por resorción (Figura 12).

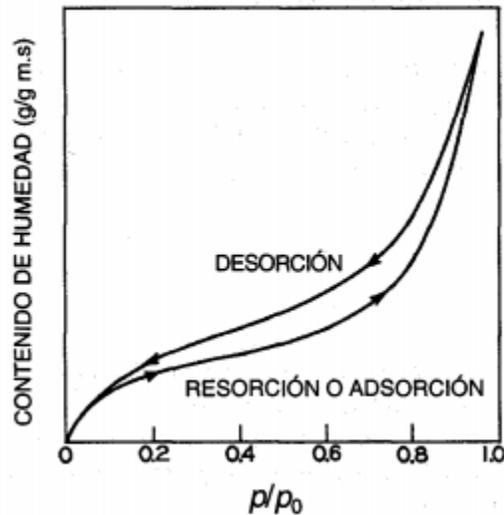


Figura 12. Isoterma de desorción y absorción (Fennema 2010)

1.2 Conservación de los alimentos

1.2.1 Congelación

La congelación es el proceso de preservación originado por la reducción de la temperatura por operación previa a la liofilización influye determinadamente en características tales como el color y la densidad del producto final, así mismo en la velocidad de sublimación. El debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales en un material alimenticio.

La congelación es uno de los métodos de conservación más importantes para la carne y productos cárnicos en comparación con otros métodos, que conduce a una pérdida mínima de calidad durante el almacenamiento a largo plazo. El almacenamiento en congelado se utiliza para retardar las reacciones bioquímicas indeseables en la carne, pero hay alguna interrupción y la destrucción de fibra muscular celular debido a la formación de cristales de hielo (Sebranek, 1982).

El tamaño del cristal y la distribución en los espacios intra o extracelulares varían con la velocidad de congelación, mientras que la cantidad de hielo formado depende de la temperatura alcanzada durante la congelación. Por lo tanto, la tasa de congelación y la temperatura de almacenamiento influyen en la estructura de la carne congelada y sus cualidades sensoriales (Gordon y Barbut, 1990). La congelación, como proceso, se discrimina en tres etapas (Figura 13).

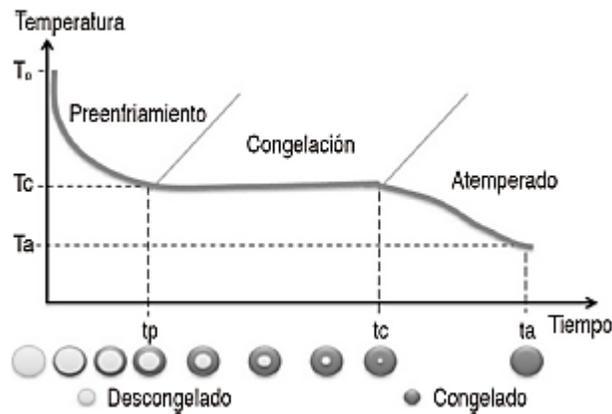


Figura 13. Etapas de la congelación (García, 2017)

- Pre-enfriamiento, que es el período desde el inicio del enfriamiento hasta que comienza a cristalizarse el agua.
- Congelación, que es el período durante el cual, la temperatura del material es más o menos constante (cambio de fase) si la sustancia es pura. Antes de iniciar la congelación puede existir un ligero sub-enfriamiento seguido de un incremento de temperatura hasta el punto de fusión o congelación del material. Para el caso de un alimento, que como una aproximación puede considerarse como una solución acuosa, la temperatura en la que comienzan a aparecer los primeros cristales de hielo - T_i - está siempre por debajo de la del punto de fusión del agua. Se puede presentar un sub-enfriamiento como en el primer caso, pero el cambio de fase se hace con temperatura variable, cristalizando inicialmente sólo agua pura hasta un punto en el que se comienzan a formar los cristales del "soluto" (o del alimento o solución concentrada), lo que nuevamente causa un pequeño salto en la temperatura, conocido como punto eutéctico, seguido por una "meseta" de congelación (se ha dibujado horizontal, pero generalmente es curva) que finaliza en un punto generalmente difícil de determinar, en donde se considera que el producto está completamente congelado.

- Sub-enfriamiento o atemperado, una vez que los materiales se congelan por completo, sigue un descenso de temperatura aproximadamente lineal, causado por el retiro de calor sensible del producto sólido, fase que concluye cuando el material alcanza la temperatura del medio refrigerante o congelador utilizado para el proceso.

A 0° C y a una presión de 760 mm de Hg el agua pura está en estado líquido. Debajo de esta temperatura y en presencia de gérmenes o núcleos cristalinos el agua se congela con liberación de calor para cederlo al hielo, que cristaliza en forma hexagonal birrefringente. El agua puede estar debajo de 0° C sin solidificarse, fenómeno denominado sub-fusión y se produce principalmente en los sistemas capilares y en cualquier otro sistema donde las moléculas estén sin libertad de movimientos.

En este estado el sistema es sumamente inestable y un choque mecánico o la introducción de una molécula extraña pueden provocar la cristalización inmediata. El grado de cristalización y la talla de los cristales dependen de la rapidez de la congelación. Si la congelación es rápida se forman numerosos cristales de pequeño tamaño si se congela a muy baja temperatura y muy rápido no hay cristalización y el agua se congela en un solo bloque transparente, fenómeno denominado vitrificación. Si la congelación es lenta, se forman pocos centros cristalinos y los cristales son gruesos e irregulares. La presencia de sales provocan dos cambios fundamentales: La forma de la cristalización y la rapidez en la formación de los mismos, que es considerablemente disminuida.

1.2.1.1 Afectación en lípidos

Durante el almacenamiento congelado, muchas reacciones pueden ocurrir entre los diferentes componentes de la carne. Por ejemplo, en carnes de pescado y aves, son susceptibles a reacciones oxidativas debido a sus altas concentraciones de catalizadores de oxidación (tales como la mioglobina y hierro) y los lípidos (Asghar *et al.*, 1988).

La oxidación lipídica es la principal forma de deterioro de los alimentos almacenados. Las reacciones oxidativas en la carne son el factor más importante en las pérdidas de calidad, incluyendo sabor, textura, valor nutritivo y color. La oxidación lipídica es inducida por oxidación y / o generación de radicales libres de lípidos y los resultados en la generación de compuestos tóxicos como los malondialdehído y colesterol productos de oxidación (Morrissey *et al.*, 1998). La oxidación de fosfolípidos causa cambios perceptibles en calidad de la carne. Por ejemplo, se han observado en la

carne congelada la descomposición de fosfolípidos por las lipasas. Estas reacciones se producen a varias temperaturas de congelación y de los períodos de almacenamiento (Pikul *et al.*, 1984).

1.2.1.2 Afectación en proteínas

En el proceso de congelación, el agua presente en la carne como agua libre e inmovilizada, cambia de estado, pasando a ser una sustancia menos densa, es decir, la misma cantidad de agua, una vez congelada, ocupa mayor volumen, lo cual hace pensar que si los cristales se forman por agregación habrá sitios donde la presión causada por la expansión del agua será tal que ocasionará daño principalmente sobre las proteínas miofibrilares, el cual se estará manifestando en las pérdidas durante el proceso de descongelación.

Las células musculares contienen altas cantidades de proteínas, que también pueden verse afectados por las reacciones oxidativas. La oxidación se ha demostrado que induce una serie de cambios en las proteínas, como la modificación de las cadenas laterales de aminoácidos, la formación de polímeros de la proteína, pérdida de solubilidad, aumento de grupos carbonilo, cambio en la composición de aminoácidos y aumento en la susceptibilidad proteolítica (Levine, *et al.*, 1990)

Los cambios químicos inducidos durante la oxidación de proteínas por especies de radicales de oxígeno son responsables de muchas modificaciones biológicas, tales como solubilidad de la proteína, la fragmentación de proteínas o agregación (Decker *et al.*, 1993).

Los radicales libres reaccionan con cadenas laterales de las proteínas para producir radicales libres de proteínas, que reaccionan con el oxígeno molecular para formar radicales peroxi. Los hidroperóxidos de proteínas pueden descomponerse a continuación a derivados de carbonilo. La oxidación de grupos sulfhidrilo puede conducir a la formación de reticulaciones de disulfuro ya sea intra o inter-proteína o a la formación de conjugados de disulfuro mixtos con glutatión, cisteína u otros mercaptanos de bajo peso molecular. Decker *et al.* (1993) observaron que los polímeros de alto peso molecular fueron producidos por enlaces disulfuro y se derivan principalmente de la miosina y la actina.

El ataque de las especies reactivas del oxígeno en las proteínas musculares conduce a la pérdida de grupos sulfhidrilo y la generación de compuestos de carbonilo. Estos procesos son comúnmente vinculados a una disminución de la funcionalidad de la proteína muscular, lo que lleva al aumento

de las pérdidas de agua, geles o emulsiones de proteína más débiles y menos estables (Xiong, 2000). La oxidación de proteínas puede monitorizarse mediante la medición de la formación de grupos carbonilo y la disminución en los grupos sulfhidrilo (Stadtman, 1990).

1.2.1.3 Transferencia de calor

Los distintos métodos conocidos de cálculo del tiempo de congelación se basan en diferentes soluciones del balance diferencial de energía térmica, que Tiempos de congelación simplificado para un alimento sólido, resulta:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta (k \Delta T) \quad (4)$$

Donde T es la temperatura, t el tiempo, ρ la densidad, C_p el calor específico y k la conductividad térmica. Los alimentos presentan distintas formas geométricas, regulares e irregulares. En el presente trabajo nos ocuparemos principalmente de las formas regulares, con transferencia de energía en una única dirección: placa plana infinita, cilindro infinito y esfera.

1.2.1.3.1 Consideraciones

- El flujo de calor en la superficie es constante y conocido (condición de contorno de segundo tipo).
- El flujo de calor en la superficie puede expresarse según $k \frac{dT}{dr} = h (T - T_o)$ conocida como "ley de enfriamiento" de Newton o condición convectiva (condición de contorno de tercer tipo, la más habitual en la congelación industrial).
- La temperatura de la superficie es una dada función del tiempo (condición de contorno de cuarto tipo).

1.2.1.4 Ventajas

- Prolongar la vida útil de alimentos altamente perecederos, que posteriormente son introducidos al mercado descongelados, y consumidos como "productos frescos". Esta operatoria permite absorber las variaciones estacionales de la oferta, como ejemplo podemos citar frutillas, espárragos, etc.

- Producir alimentos procesados como hamburguesas, productos de carne, pollo o pescado empanados, platos preparados listos para calentar y servir, etc. Estos productos día a día cuentan con mayor número de consumidores, en parte debido al ritmo de vida actual en las grandes ciudades, donde cada vez se reduce más el tiempo disponible para las tareas hogareñas.
- Congelar materias primas o productos semi procesados que son almacenados para posteriormente ser descongelados y elaborados.

1.2.1.5 Desventajas

- Daños en apariencia por modificación en el color
- Quemaduras por frío, debido a la sublimación de cristales de hielo hacia la atmosfera del contenedor, observándose como decoloraciones o manchas de color ámbar sobre la superficie de la carne, causada por pequeñas bolsas de aire que disipan la luz incidente.
- Deshidratación por el paso paulatino del agua de la superficie de la carne hacia la atmosfera del contenedor
- Goteo, consecuencia de la pérdida de agua no reabsorbida por proteínas y que se pone de manifiesto durante el descongelado, perdiéndose con ella otros componentes hidrosolubles (proteínas, péptidos, aminoácidos, ácido láctico, vitaminas y minerales) (Coria, 2011).

1.2.2 Liofilización

El secado por congelación o liofilización es la extracción de agua por sublimación del estado sólido (hielo). En este proceso, la comida es primero congelada y después se somete a alto vacío, con lo que se sublima el hielo (es decir, se evapora directamente, sin fusión). El vapor de agua liberado es generalmente atrapado en la superficie de un condensador a muy baja temperatura.

Como un fenómeno físico y una técnica de laboratorio, la liofilización era ya conocida al final del siglo 19. Sin embargo, no se desarrolló en un proceso industrial hasta después de la Segunda Guerra Mundial (Flosdorf, 1949).

La liofilización industrial en alimentos iniciadas a finales de 1950. En la industria alimentaria, el interés en la liofilización comercial surge de la calidad superior de la congelación de productos secos en comparación con los alimentos deshidratados por otros métodos. La liofilización se lleva a cabo

a bajas temperaturas, preservando así sabor, color y apariencia, y reduciendo al mínimo el daño térmico al calor sensible de los nutrientes.

La liofilización no altera el valor biológico de las proteínas cárnicas y, de hecho, pueden mejorarlo. Sin embargo, hay una pérdida de aproximadamente 30 % del contenido de tiamina de la carne durante la liofilización, pero esto también podría ocurrir cuando se cocina en cualquier caso. La característica más sobresaliente de los productos liofilizados es su rápida solubilidad, esto se debe fundamentalmente a la estructura extraordinariamente porosa que presentan, con una gran superficie ya que el producto sólido ocupa sustancialmente el mismo volumen de la solución ó masa inicial. Debido a que el proceso se desarrolla a muy bajas temperaturas, las sustancias lábiles al calor no experimentan alteraciones, por la misma razón no se producen reacciones enzimáticas ni proliferación de microorganismos, de esta manera el proceso puede efectuarse en ambiente estéril (Lawrie, 1985). Dado que todo el proceso se produce en estado sólido, la contracción y otros tipos de cambios estructurales se evitan en gran parte. La liofilización es, sin embargo, un método costoso de deshidratación. Es económicamente factible sólo en el caso de productos de alto valor añadido y siempre que la calidad superior del producto justifique el mayor costo de producción (Ratti, 2001).

1.2.2.1 Proceso

Posterior a la congelación, la liofilización se produce en dos etapas (Figura 14), pero previo a la liofilización es importante considerar la congelación y las condiciones en que esta se lleva a cabo (Oetjen y Haseley 2004).

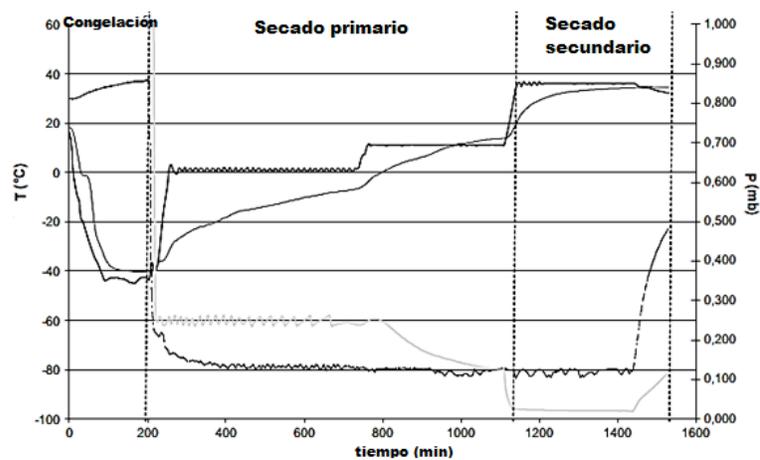


Figura 14. Etapas de la liofilización (Jelena Babic, 2009)

En la primera etapa, se busca que el producto ya congelado tenga una estructura sólida sin intersticios en los que haya líquido concentrado para propiciar que todo el secado ocurra por sublimación. En los alimentos se pueden obtener distintas mezclas de estructuras luego de la congelación que incluyen cristales de hielo, eutécticos, mezclas de eutécticos y zonas vítreas amorfas. Estas últimas son propiciadas por la presencia de azúcares, alcoholes, cetonas, aldehídos y ácidos, así mismo como por las altas concentraciones de sólidos en el producto inicial.

La velocidad óptima de congelación con fines de liofilización depende en gran parte de la naturaleza del producto, la variación en la velocidad de congelación afecta al tamaño de los cristales de hielo y por tanto al tamaño del poro en el producto seco, siendo de esperar, en consecuencia, que influya en la velocidad de deshidratación y en las características del producto, sobre todo en su rehidratación (Laopoolkit y Suwannaporn, 2011).

La segunda etapa es el secado desorción, durante el cual la mayor parte del descongelado se elimina el agua adsorbida en la matriz sólida. Típicamente, la liofilización es llevada a un contenido de humedad final de 13 %. Durante esta etapa ocurre el secado por sublimación (Figura 15).

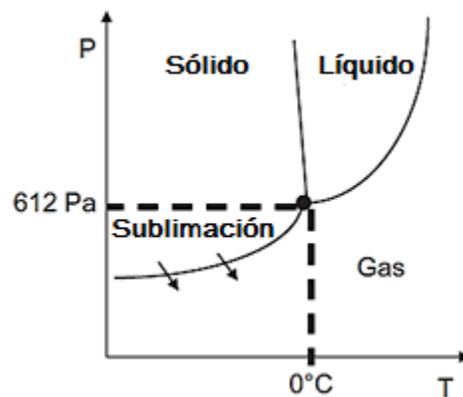


Figura 15. Transición de la sublimación (Zeki Berk, 2013)

La sublimación es la transición directa del estado sólido al estado gaseoso sin pasar por el líquido, se produce en un intervalo definido de temperaturas y presiones, dependiendo sobre la sustancia en cuestión. El diagrama de fases del agua pura indica que la sublimación del hielo de agua puede ocurrir sólo si la presión de vapor y la temperatura son inferiores, es decir, por debajo del punto triple, por debajo de 611,73 Pa 0,01 y C, respectivamente (Zeki Berk, 2013). Teóricamente, el secado

por congelación debería ser posible a la presión atmosférica, proporcionado que la presión parcial de vapor de agua sea muy baja, es decir, el aire es muy seco (Ocansey, 1984; Karel, 1975).

Cuando en el proceso de liofilización comienza el calentamiento, empieza a formarse un frente de sublimación o interface entre la capa seca y la capa congelada de la muestra el cual avanza progresivamente. La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca de la muestra bajo la acción de una diferencia de presión, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande.

1.2.2.2 Transferencia de calor y masa

Como cualquier otro proceso de deshidratación, la liofilización implica simultánea transferencia de calor y de masa (Karel, 1975). La distribución del contenido de humedad a través de la material que se somete a liofilización es diferente que en otros procesos de deshidratación. La velocidad de transferencia calórica depende del grosor y de la conductividad térmica de la capa de hielo, por lo que, a medida que la deshidratación progresa, el grosor de la capa de hielo disminuye y en consecuencia, la velocidad de transferencia calórica aumenta. La temperatura en la superficie del alimento se controla cuidadosamente para evitar su descongelación (Androit, 2004).

La velocidad de transferencia calórica al frente de la sublimación depende del grosor y área del alimento, de la conductividad térmica de la capa liofilizada y de la diferencia entre las temperaturas en la superficie del alimento y en el frente de hielo. Si la presión se mantiene constante en el equipo liofilizador, la temperatura del frente de hielo también se mantiene constante, como consecuencia se generan dos zonas en el alimento liofilizado (Figura 16) y a medida que se liofilice la zona seca recorrerá espacio a la congelada.

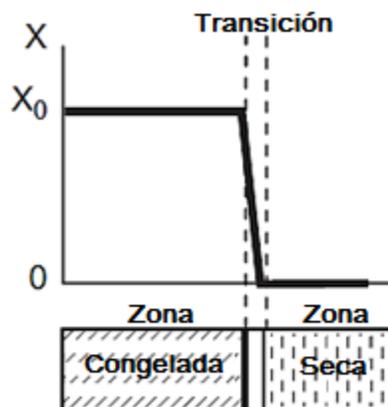


Figura 16. Transferencia de masa durante liofilización (Zeki Berk, 2013).

Idealmente, hay dos zonas distintas, separadas por una interfaz de transición de fase bastante estrecha, en donde se observa: una zona congelada y una zona "seca". La zona congelada está en el contenido de humedad original. La zona seca, está desprovisto de cristales de hielo, y la única zona en la que se adsorbe agua, es en la matriz sólida. La proporción de humedad adsorbida es generalmente pequeña, y la distribución de contenido de agua a través del material puede ser idealizado como una función escalonada. La interfaz entre las dos zonas se conoce como el "frente de sublimación". La cantidad de calor a ser transportado a la parte delantera de sublimación es considerable. El calor latente de sublimación es igual a la suma del calor de evaporación, y el calor latente de fusión. Para el agua a 0°C, esto equivale a aproximadamente 3.000 kJ/kg^{-1} . El calor puede ser aplicado a la parte delantera donde la sublimación se da por una serie de mecanismos. Los dos modos más comúnmente aplicadas de suministro de calefacción son la radiación de las superficies calientes, y la conducción. El calentamiento por microondas es una opción interesante (Zeki Berk, 2013).

1. La radiación de las superficies calientes. En este caso, el calor se suministra a la expuesta superficie de la zona seca por radiación térmica y luego viaja a través de la zona seca a la parte delantera de la sublimación, principalmente por conducción. El vapor de agua liberado, también viaja a través de la zona seca pero en la dirección opuesta, desde la sublimación frente a la superficie y desde allí al condensador.
2. Póngase en contacto con una superficie caliente. En una realización común de este modo, bandejas que contiene el material congelado se colocan en los estantes calentados. El calor es transferido a la zona de sublimación por conducción a través de la capa congelada. El vapor de agua se transfiere a través de la capa seca como antes.

1.2.2.2.1 Consideraciones

El tiempo de secado es proporcional al cuadrado del espesor (Z) de la muestra En consecuencia, la carga de la bandeja (masa del material por unidad de área de la bandeja) y el tamaño de las partículas (en el caso de materiales en partículas) tienen un efecto muy fuerte en el tiempo de secado. Sin embargo, esta conclusión no es siempre el apoyo de la experimentación (Khalloufi, 2005).

1. El tiempo de secado es proporcional a la diferencia entre el contenido de agua inicial y final.

2. El tiempo de secado depende en gran medida de los dos procesos independientes y del control de las variables, a saber, la temperatura en la superficie (T_o) y la presión de vapor en el condensador (P_o) (de ahí temperatura del condensador).
3. El tiempo de secado es inversamente proporcional a la conductividad térmica (k) y la permeabilidad de la capa seca. Ambos parámetros dependen de la porosidad de la capa y de la presión. A más poroso, presentara una conductividad térmica más baja, pero mayor permeabilidad al en relación al vapor a transferir. La porosidad de la capa seca depende de la proporción volumétrica del hielo en el material congelado, por lo tanto, en el contenido de humedad inicial (Simatos, 1975). Además, la naturaleza de la porosidad depende del tamaño y distribución de los cristales de hielo. Si el alimento se ha congelado lentamente, la formación de grandes cristales predominaran en el material congelado y la capa seca tiene una porosidad más abierta, lo que resulta en una mayor permeabilidad. Al disminuir la presión, aumenta la conductividad térmica y la permeabilidad disminuye, pero el efecto de la presión en la térmica conductividad es más fuerte. Como resultado, un aumento en la presión de la cámara acelera la velocidad de secado por congelación (Karel, 1975).

1.2.2.3 Partes de la liofilizadora

Un equipo de liofilización está compuesto por:

- Cámara
- Condensador
- Grupo de frio
- Grupo de vacío
- Grupo calefactor

El Liofilizador consta de una cámara cilíndrica (Figura 17) con una puerta en inoxidable y con bandejas en su interior montadas en una superficie de trabajo de acero inoxidable. El producto se coloca en su interior congelado previamente. Seguidamente se arranca el grupo de vacío hasta llegar a una presión inferior a la presión del vapor de saturación del hielo. A partir de ese momento se producirá la sublimación. Para evitar que el vapor de agua contamine el grupo de vacío, se intercala un condensador con un grupo frigorífico que proporcione una temperatura inferior a la temperatura mínima de la cámara, de este modo el condensador atrapa el agua condensándose en sus paredes.

Para conseguir la sublimación necesitaremos un grupo calefactor que nos proporcione calor y así la temperatura a aplicar a cada producto.

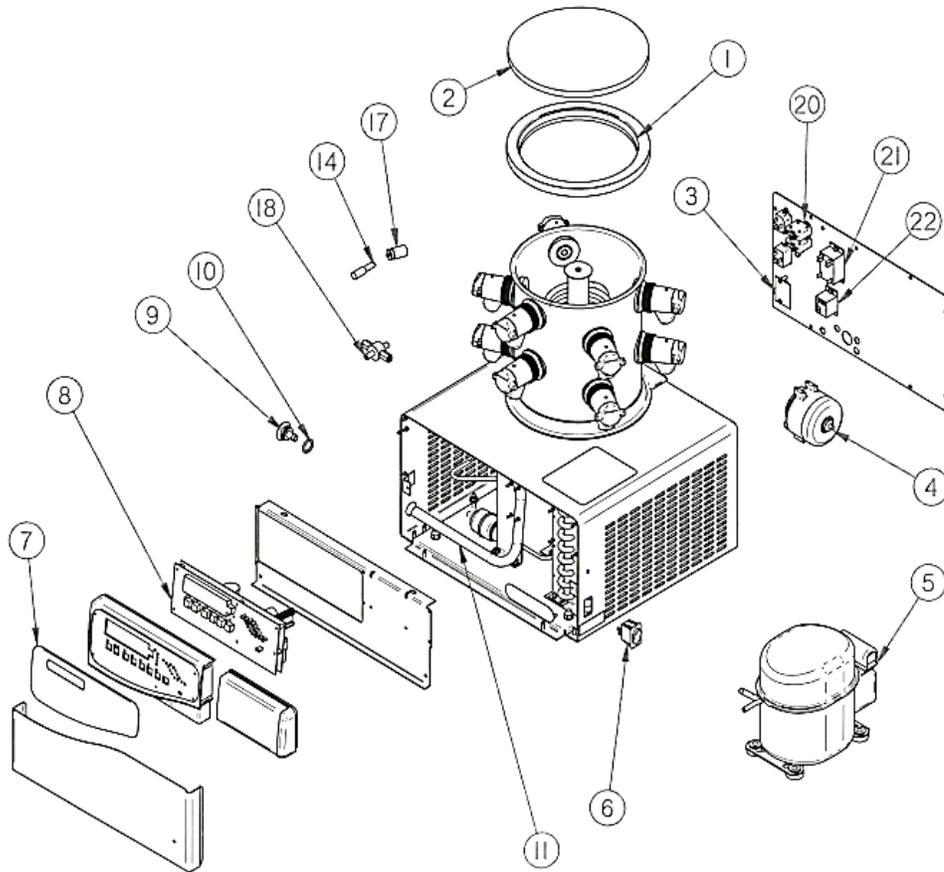


Figura 17. Partes del equipo liofilizador (<https://www.labconco.com/2007>)

Éste equipo tiene cuatro componentes principales: la cámara de secado, el condensador y el sistema de vacío y control de instrumentación. La función básica del liofilizador es crear el entorno necesario para el proceso de liofilización. Esta sección, en general, no se ocupará de la operación de este equipo, sino del efecto que diversos componentes en los secadores pueden tener sobre el proceso.

1. Cámara del liofilizador: La cámara del secador sirve al proceso de liofilización mediante las siguientes funciones:(a) proporcionar un entorno limpio y a veces estéril para el proceso; y (b) proporcionar las temperaturas y presiones necesarias para congelar y secar el producto.
2. Condensador: La principal función del condensador es eliminar los vapores condensables antes de que entren en el sistema de bombeo de vacío.

3. Sistemas de vacío: El sistema de vacío, está conectado a la cámara del condensador y su función es proporcionar las presiones necesarias para las fases desecado primario y secundario. Los dos rasgos principales de un sistema de vacío que requieren consideración son la tubería de comunicación con el condensador y la naturaleza de la bomba de vacío.
4. Instrumentación: La instrumentación asociada con la liofilizadora es de gran importancia. El logro de un óptimo producto requiere un sistema de control que reproduzca el proceso de liofilización, siempre que esté dentro de los límites del equipamiento y de un sistema de recolección de datos que verifique la consistencia del proceso.

Adicionalmente, es necesario que cada uno de los componentes del liofilizador (Cuadro 2) se someta a mantenimiento de acuerdo a las horas de uso del equipo establecidas en el manual.

Cuadro 2. Componentes del equipo liofilizador

ARTICULO	DESCRIPCION
1	Tapa de la junta
2	Tapa
3	Placa de circuito impreso
4	Motor del ventilador
5	Compresor
6	Interruptor
7	Control de la etiqueta del panel
8	Placa del circuito impreso
9	Tapón de drenaje
10	Anillo
11	Manguera de drenaje
12	Manguera de vacío
13	Cable de alimentación
14	Sensor de vacío
15	Sensor de temperatura
16	Cable de alimentación
17	Control de vacío/Válvula de purga
18	Sensor de humedad
19	Cable de control
20	Cortacircuitos
21	Retransmisión de bomba de vacío
22	Retransmisión de la refrigeración

Fuente: <https://www.labconco.com/category/freezone/2007>

1.2.2.4 Ventajas

- Se obtienen productos de redisolución rápida
- La forma y característica del producto final son esencialmente originales
- Es un proceso idóneo para sustancias termolábiles
- Contenido muy bajo de humedad final
- Compatible con la elaboración en medio séptico
- Pérdida mínima de constituyentes volátiles
- Empleo de temperaturas muy bajas, circunstancia que permite aumentar la estabilidad del producto y disminuir la pérdida de sustancias volátiles
- Ocupa poco volumen y poco peso
- Producto final liofilizado, es decir, con alta porosidad, solubilidad rápida y completa y condiciones estériles
- Contenido final de humedad < 0.5 %
- Empleo de vacío: no existe oxidación
- Los productos serán estables en un amplio rango de temperaturas, eliminando la necesidad de una complicada cadena de frío y distribución.
- El bajo peso y la facilidad de manejo harán que los costos de envío sean reducidos dramáticamente.
- Quitar el agua guarda el alimento del estropeo por un período largo de tiempo: El alimento se estropea cuando los microorganismos tales como bacterias, se alimentan en la materia y la descomponen, las bacterias tienen la capacidad de lanzar productos químicos de desecho que causan enfermedad o pueden hacer que el alimento no tenga buen sabor y contribuyan al estropeo del alimento.
- Rehidratación instantánea sin necesidad de cocción
- Técnica de conservación que no necesita aditivos
- Detiene el crecimiento de microorganismos, inhibiendo el deterioro de sabor y color por reacción química, y pérdida de propiedades fisiológicas.

1.2.2.5 Desventajas

- Costo elevado de los equipos. Por lo tanto solo se somete a ellos, alimentos de valor en los que interesa conservar íntegros los aromas (como café, hierbas aromáticas, especias) o que van a ser destinadas a un fin determinado

- Elevado gasto energético
- Proceso largo (24 horas), por lo cual es muy elevado su coste
- Alimentos que son muy ricos en agua (sandías, algunas verduras) emplean más tiempo y es recomendable no someterlos a este proceso

1.2.2.6 Aplicaciones

- En el campo farmacéutico: Existen moléculas que para su uso como fármaco requieren de una previa liofilización Ejemplo: agentes quimioterapéuticos cisplatino y doxorubicina.
- La liofilización de microorganismos se hace actualmente de forma rutinaria; muchos de ellos se mantienen en medios de cultivos para almacenarse y distribuirse en forma liofilizada.
- En el área de la alimentación, por medio de la liofilización los alimentos se mantienen intactas todas sus cualidades: forma, gusto, sabor, color y valores nutricionales, libre de aditivos y conservantes. Tienen larga vida útil. No necesitan demasiados cuidados de almacenamiento, solo requieren ser almacenados en un lugar fresco y seco. Son de fácil aplicación, rehidratación instantánea y excelente microbiología.
- En la investigación por ejemplo en microscopía de muestras húmedas, pueden distorsionarse debido a un secado por evaporación en condiciones normales. Estas distorsiones son debidas a las fuerzas de tensión superficial generadas durante todo el tiempo que dure la evaporación. Si la muestra es previamente liofilizada la distorsión se reduce enormemente, generando resultados más fiables.

1.3 Rehidratación

1.3.1 Generalidades

La mayoría de los productos deshidratados deben ser reconstituídos antes de su consumo, lo que hace necesario determinar las condiciones óptimas para la realización de dicho proceso; en consecuencia, es importante obtener productos rehidratados de textura aceptable en el menor tiempo posible. Diversos investigadores han reconocido que el grado de rehidratación es dependiente de la composición original del producto, condiciones del proceso y preparación, así como de la extensión del desorden químico y estructural provocado por el secado (Okos, Narsimhan, Singh y Weitnauer, 1992; Lewicki, 1998). La gran variedad de alimentos deshidratados que hoy están a disposición del consumidor (aperitivos, mezclas secas y sopas, frutas secas, etc.) y la interesante preocupación por el cumplimiento de las especificaciones de calidad y la conservación de energía,

hacen hincapié en la necesidad de una profunda comprensión de la operación y los problemas relacionada con el diseño y la operación de deshidratación y rehidratación.

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales originales del material fresco (previo al secado o deshidratado) poniendo en contacto el producto seco con agua. No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida y Kouris, 2003).

Es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Las operaciones previas a la deshidratación, llamadas pretratamientos, tienen marcada influencia sobre las características y la composición del producto finalmente rehidratado. Aquellos pretratamientos que contribuyen a mantener la integridad de los tejidos permiten evitar mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación (Lewicki, 1998). Ya durante el escaldado de vegetales, existen pérdidas por difusión de sólidos: vitaminas, azúcares, aminoácidos, minerales; adicionalmente una cantidad importante de sólidos solubles puede migrar a la solución durante la rehidratación, afectando la calidad nutricional del producto y su capacidad de imbibición de agua (Marabi, 2004). Los pretratamientos que emplean altas presiones, previos a la deshidratación osmótica provocan cambios en la estructura de los tejidos, la compactación de las estructuras celulares y transformaciones de los geles de la pectina, modificando negativamente la posterior rehidratación del producto (Rastogi, 2004).

Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pretratamientos al secado. En algunos casos la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, los que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal (Weerts *et al.*, 2006).

Los alimentos deshidratados deben en lo posible rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, como también sus propiedades nutricionales y sensoriales (Vega 2003). Para ello se han propuesto nuevas tecnología de secado

además de combinaciones de las ya existentes, pero de altos costos, no resultando rentables a nivel industrial. Por ejemplo, se han realizado experimentos de rehidratación aplicando vacío y ultrasonidos (Lee, Farid y Nguang, 2006). No obstante, el aumentar la temperatura de la solución rehidratante sigue siendo el método más utilizado para reducir el tiempo de rehidratación sin incurrir en mayores costos de operación.

Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más simple, en soluciones azucaradas (glucosa, sacarosa, trehalosa), leche, yogur, jugos de frutas y verduras, entre otras, donde los períodos de inmersión, deben ser breves, y estos medios de rehidratación ayuden a conseguir un producto de características similares al producto fresco (Rastogi, 2004).

1.3.2 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación

Dentro de los factores que influyen en los mecanismos de transferencia de materia ocurridos durante el fenómeno de rehidratación de alimentos, están los factores propios del proceso de deshidratación (pretratamiento, método de secado, temperatura y velocidad de secado, almacenamiento) y las condiciones de rehidratación a utilizar (Lewicki, 1998a).

1.3.2.1 Factores extrínsecos

1.3.2.1.1 Pretratamiento al secado

Todo pretratamiento de secado tiene cierta influencia sobre el producto deshidratado en el proceso posterior de rehidratación. Estos pretratamientos se pueden citar de acuerdo a tratamientos químicos con compuestos inorgánicos (dióxido de azufre, cloruro de calcio, metabisulfito de potasio, cloruro de sodio, bicarbonato de sodio), orgánicos (sacarosa, glicerol, dextranos, almidón) o no químicos (osmosis, escaldado, congelado, altas presiones) (Lewicki, 1998b). Por ejemplo la tecnología con altas presiones pueden ser utilizados para reducir la pérdida de solutos durante la rehidratación, una posible razón se puede atribuir a los cambios estructurales por las altas presiones: compactación de la estructura celular y la formación de una re-gel con iones ligados a pectina de-esterificada (Rastogi, 1998).

1.3.2.1.2 Método de secado

Los diferentes tipos o sistemas de secado son la principal causa que pudiese afectar la rehidratación del producto deshidratado. También se pueden hacer combinaciones de los sistemas de secado, por ejemplo aire caliente con microondas, irradiación previa o al mismo tiempo; igualmente se debe considerar el tipo de secado que menor daño provoque a la estructura del producto, y sobre sus propiedades sensoriales y nutricionales. Por ejemplo, la combinación de deshidratación osmótica y aire caliente mantiene de mejor manera el color superficial del pimiento que el secado solo por aire caliente. Alimentos con alto contenido de almidón (papas) secados con microondas retienen dos veces más vitamina C que por secado convectivo. Recientemente, pretratamientos con campos de pulsos eléctricos, ultrasonidos e infrarrojo en combinación con secado convectivo permiten una mejor permeabilización de las membranas celulares, menos cambios estructurales y una mayor retención de sólidos luego de la rehidratación (Krokida y Kouris, 2003).

1.3.2.1.3 Temperatura y velocidad de secado

se ha observado que altas temperatura de secado implican un menor tiempo de rehidratación, pero los índices de calidad del producto final presentan cambios muy variables con respecto al producto fresco, como son la textura y el color, dejando ver que la temperatura de secado es uno de los principales factores que influyen sobre la calidad del producto rehidratado. El aumento de la velocidad de secado provoca un menor tiempo de secado, pero también presenta la misma tendencia que la temperatura de secado, un mayor daño celular (Lewicki, 1998).

1.3.2.1.4 Temperatura de almacenamiento

Durante el almacenamiento se va perdiendo calidad de los productos deshidratados (color, aroma, textura), además aparecen reacciones de pardeamiento no-enzimático. Estos daños se hacen más severos a medida que se aumenta la temperatura de almacenaje, ya que a mayor temperatura mayores son los cambios composicionales y estructurales de los polisacáridos de la pared celular y menor la capacidad de absorción de agua, reflejándose esto último en la rehidratación. Por todo lo anterior es que se debe optimizar las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad relativa, oxígeno, ventilación, condiciones higiénicas, equipos, entre otros (Weerts, 2006).

1.3.2.2 Factores intrínsecos

1.3.2.2.1 Líquido de rehidratación

Como se comentó, los alimentos deshidratados generalmente se rehidratan con agua, pero en algunos procesos se utilizan medios de rehidratación tales como leche, yogur, disoluciones azucaradas o salinas, entre otros, siempre con el fin de mejorar las características finales del producto rehidratado, como son la textura, retención de color y aroma, aumento de la viscosidad, disminución de la actividad de agua (a_w), reducción de tiempos de proceso, entre otros. La velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, en cambio es menor por ejemplo en soluciones azucaradas, leche o yogurt, debido a la elevada viscosidad que presentan éstas, sin embargo, estas últimas pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros.

1.3.2.2.2 La temperatura de la solución de rehidratación

Un alimento deshidratado a una temperatura constante, y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio cuanto mayor sea la temperatura de rehidratación (Figura 18), debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión, además la alta presión que se ejerce sobre los gases que pudiesen estar atrapados entre los espacios intercelulares, permite que se mueven por difusión o capilaridad, tomando ese lugar el líquido rehidratante.

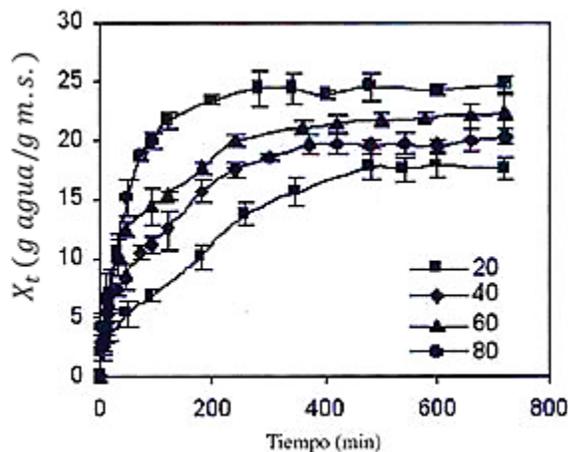


Figura 18. Rehidratación de papaya a 4 temperaturas diferentes (Vega, 2003)

Con el aumento de la temperatura del medio de rehidratación se incrementa la velocidad del proceso, debido principalmente al aumento de la difusividad de agua y de solutos, otorgando así una reducción sustancial del tiempo de rehidratación. Esto influye sobre ciertas características del producto, como son la estructura de la pared celular, produciendo la pérdida de nutrientes y colorantes, no obstante con algunos pretratamientos al secado se pueden evitar en parte estos problemas.

Se ha demostrado que rehidratar con temperaturas menores a 40°C mantiene la estructura original las pectinas presentes en la pared celular mejorando la capacidad de absorción de agua por el tejido. En otras investigaciones se ha logrado acelerar el proceso de rehidratación por medio de técnicas combinadas, destacándose la rehidratación con impregnación al vacío, uso de ultrasonido, adición de aditivos en el agua de rehidratación, etc., aunque estas técnicas son de elevado costo operacional (Vega 2003; Lewicki, 1998).

1.3.2.2.3 Agitación durante la rehidratación

La generación de turbulencia en el medio de rehidratación logra una mayor homogenización, aumentando la entropía del sistema y la facilidad del intercambio de materia (agua y solutos), siempre teniendo en cuenta la velocidad de agitación (Kaymack, 2000).

1.3.2.2.4 Características del producto

Antes de aplicar rehidratación a alimentos deshidratados, se deben conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, ya que las propiedades físico-químicas, mecánicas (micro estructurales), sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación (Bilbao, Andrés, y Fito 2005; Aguilera y Stanley, 2001).

1.3.3 Transferencia de materia

Referente a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación (Figura 19), Marín (2006) menciona que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un

equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos (Krokida, 2003).

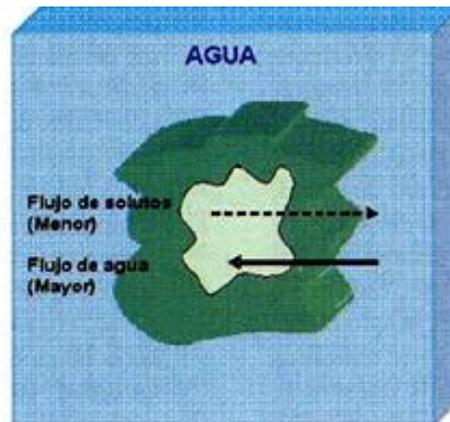


Figura 19. *Transferencia de masa durante la rehidratación (Marín 2006)*

En resumen, en el fenómeno de la rehidratación existen tres procesos simultáneos: a) la absorción de agua dentro del material deshidratado. b) la lixiviación de solutos y c) el hinchamiento del material, donde el cambio de volumen del producto deshidratado es proporcional a las cantidad de agua absorbida, aumentando o recuperando su tamaño y volumen inicial. Las variables operacionales del secado (temperatura, velocidad de aire, humedad relativa y tiempo) afectan significativamente la calidad final del producto rehidratado, por lo que es común utilizar índices numéricos para observar este efecto, entre estos indicadores destacan la capacidad de rehidratación y la capacidad de retención de agua. En cuanto respecta a la transferencia de materia (agua) ocurrida durante el proceso de rehidratación de un alimento deshidratado existen varias ecuaciones empíricas que ajustan los datos experimentales de humedad en función del tiempo. Dentro de las más utilizadas están: el modelo difusional, el cual utiliza la segunda ley de Fick (ecuación 2), el modelo empírico de Peleg (ecuación 3) y el modelo probabilístico de Weibull (ecuación 4), las cuales se ha demostrado que simulan correctamente el proceso, además de describir ciertos mecanismos y variables existentes durante el mismo. En la mayoría de los estudios realizados sobre la rehidratación de los alimentos, los modelos de Fick y Peleg son los más usados por presentar parámetros de importancia para la optimización de los procesos (Bilbao, 2005).

$$\text{Fick } \frac{\partial X_{wt}}{\partial t} = D_{we} \frac{\partial^2 X_{wt}}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\text{Peleg } X_{wt} = X_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (6)$$

$$\text{Weibull } X_{wt} = \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (7)$$

Dónde: X_{wt} es el contenido de agua a un determinado tiempo (g agua/g materia seca); t es el tiempo (minutos), X_0 es el contenido inicial de agua (g agua/g materia seca); D_{we} es el coeficiente efectivo de transferencia difusional ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); z es la distancia unidireccional del centro a la superficie del producto (m); k_1 , k_2 , α y β son constantes de cada modelo (Pascual *et al.*, 2006).

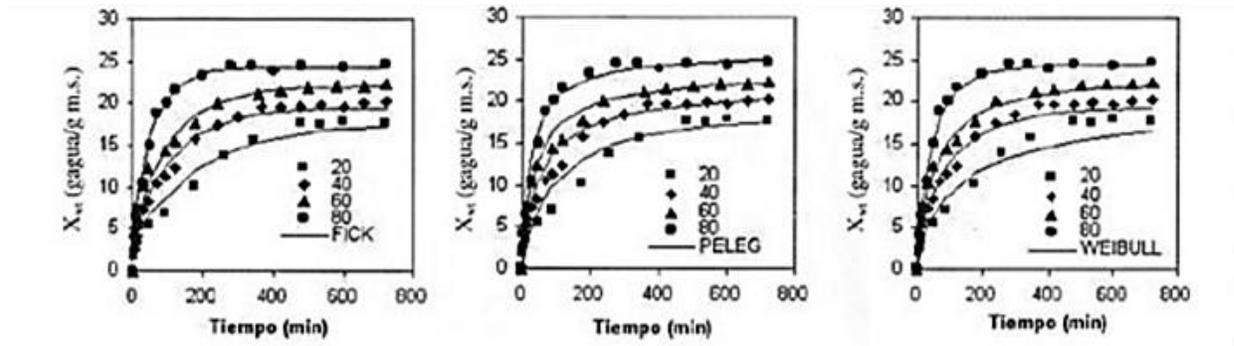


Figura 20. Curva rehidratación empleando el modelo Fick, Peleg y Weibull a diferentes temperaturas de rehidratación (Vega, 2003).

La Figura 20 muestra el modelado de la cinética de rehidratación de la papaya deshidratada utilizando los tres modelos mencionados (Fick, Peleg y Weibull), donde se utilizaron cuatro temperaturas de rehidratación (20, 40, 60 y 80 °C). Se observa que a mayor temperatura de rehidratación se alcanza un mayor contenido de humedad debido al gradiente de temperatura; además se puede distinguir que los tres modelos proporcionan una buena simulación del proceso de rehidratación (Vega, 2003).

Otro método que se puede considerar para el modelado matemático de la rehidratación de alimentos, es el método de los Elementos Finitos, en el cual considera la difusión a través de una lámina infinita, donde la D_{we} está en función de la humedad del producto en un momento dado, suponiendo una variación de la difusividad de carácter exponencial, descrita por la ecuación 6 (Lewicki, 1998).

$$D_{we} = e^{(a+bY)} \quad (8)$$

Dónde: a y b son constantes del modelo, Y es la fuerza impulsora reducida que relaciona el gradiente de la humedad de la muestra a tiempo real con la humedad inicial y la humedad de equilibrio.

Algunos autores proponen el modelar la cinética de ganancia de masa durante la rehidratación, considerando las curvas de rehidratación o la capacidad de rehidratación, para lo cual se utiliza la ecuación propuesta por Langmuir (ecuación 6).

$$\frac{m}{m_0} = \frac{C t}{K+t} \quad (9)$$

Dónde: C (g de agua/g sólido seco) sería la masa relativa en el equilibrio que depende únicamente de las características propias del tejido que rehidrata. La constante K (min) es un parámetro cinético relacionado con la resistencia que opone el tejido a la rehidratación y equivale al tiempo de rehidratación necesario para alcanzar el 50% del peso adimensional en equilibrio.

1.3.4 Cambios microestructurales (Propiedades de hidratación de las proteínas)

Al introducir un sistema alimenticio deshidratado en agua, este sufrirá cambios principalmente físicos, uno de los principales fenómenos que se presenta es la hidratación o rehidratación, según sea el caso, los componentes involucrados primordialmente son los carbohidratos y las proteínas. Al tratar sistemas cárnicos, las proteínas son las responsables de la captación de agua, en donde podemos encontrar factores tanto intrínsecos (conformación y tipo de las proteínas, distribución de cargas, peso molecular, ionización, hidrofobicidad) como extrínsecos (pH, temperatura, fuerza iónica, actividad acuosa, concentración salina y constante dieléctrica) que determinan la capacidad de rehidratación de las proteínas. El agua es un componente esencial de los alimentos y modifica las propiedades fisicoquímicas de las proteínas, por ejemplo, al ejercer un efecto plastificante sobre las proteínas amorfas o semicristalinas modifica su temperatura de transición vítrea y de fusión (TD). La transición vítrea se refiere a la conversión de un sólido vídrioso amorfo a un estado flexible plastificado, en tanto que la temperatura de fusión se refiere a la transición de un sólido cristalino a una estructura desordenada. La dispersabilidad, la humectabilidad, el hinchamiento, la solubilidad, el “espesamiento” o aumento en viscosidad, la capacidad de atrapamiento de agua, la gelificación, la coagulación, la emulsificación y el espumado, dependen todas de las interacciones

proteína-agua. Las moléculas de agua se unen a diferentes grupos en las proteínas, como los grupos cargados mediante interacciones ion-dipolo (Badui, 2006).

La capacidad para ligar agua de las proteínas se expresa como los gramos de agua por gramo de proteína cuando una proteína en polvo es equilibrada con vapor de agua a una humedad relativa del 90 al 95%. Se relaciona con la composición de aminoácidos: si hay una mayor concentración de aminoácidos cargados la capacidad de hidratación es mayor y puede ser calculada a partir de su composición de aminoácidos usando la siguiente ecuación empírica.

$$a = fC + 10.2 fN \quad (10)$$

Donde a es gramos de agua/gramo de proteína, y fC y fN son las fracciones de los residuos cargados, no polares, y polares, respectivamente. No obstante, el modelo es válido para proteínas monoméricas, ya que en el caso de las oligoméricas se presenta una interfase entre subunidad y subunidad, lo que provoca que los resultados experimentales sean mayores que los predichos por la ecuación. En la mayoría de las proteínas se cuenta con una monocapa de agua con una actividad acuosa (a_w) de 0.05-0.03, en tanto las multicapas de agua se forman en un rango de actividad de agua de 0.3- 0.7. El agua presente en la monocapa se asocia primariamente con los grupos iónicos, no se congela y no toma parte en las reacciones químicas como solvente: se le denomina agua “ligada” o tipo I. En una a_w 5 0.9, las proteínas ligan arriba de 0.3-0.5 g agua/g de proteína. Los factores ambientales como pH, fuerza iónica, tipo de sales, temperatura y conformación de la proteína, influyen sobre la capacidad de ligar agua de las proteínas.

Como se ha mencionado anteriormente, las proteínas presentan la menor capacidad de hidratación en su punto isoeléctrico (Figura 21), en el que predominan las interacciones proteína-proteína. Por encima y por debajo del mismo se modifica la carga neta y pueden hincharse y unir más agua.

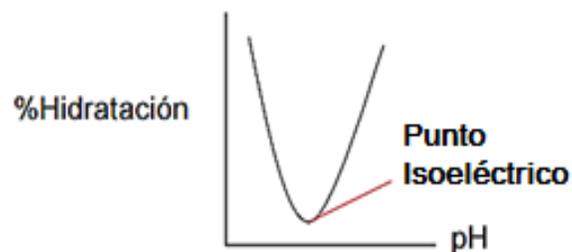


Figura 21. Representación del porcentaje de hidratación en relación al pH y pI (Medina, 2007).

En una baja concentración de sales (0.2 M) se incrementa la capacidad de ligar agua y cuando hay altas concentraciones de sales, gran parte del agua existente se liga a los iones de la sal y se deshidratan las proteínas. Conforme la temperatura se incrementa, disminuyen los hidrógenos unidos y la hidratación de los grupos iónicos disminuye. Por tanto, una proteína desnaturalizada suele unir 10% más de agua que su equivalente en estado nativo, aunado al hecho de que incrementa el área superficial de las proteínas, aunque también se debe señalar que se puede dar el fenómeno de agregación, con el consiguiente incremento de las interacciones proteína-proteína, y por ende, baja la capacidad de ligar agua.

Para las aplicaciones en alimentos la capacidad de retención del agua es más importante que la capacidad de ligar el agua, lo que se refiere a la capacidad de las proteínas para embeber agua y retenerla contra una fuerza gravitacional dentro de una matriz proteínica, como los geles de proteínas o en los músculos de carne o pescado. Por ejemplo, la capacidad de atrapar agua se asocia con la jugosidad y suavidad de la carne.

1.3.5 Efecto de las sales

La definición de una sal indica que es un electrolito fuerte, que se disocia fácilmente en agua donde es altamente soluble, y que no cambia apreciablemente el pH de sus soluciones. Son dos los efectos de añadir sales a una solución de proteínas: se producen interacciones electrostáticas de las sales con los residuos de aminoácidos cargados que en general se considera que estabilizan el plegamiento original de la molécula cuando se encuentran en bajas concentraciones, lo cual es lógico si se considera que las enzimas y proteínas en los organismos se encuentran rodeadas de un ambiente con concentración salina fisiológica. El mecanismo consiste en que los diferentes iones logran estructurar en mayor o en menor grado a las moléculas de agua a su alrededor, causando una interacción indirecta con la proteína. Por lo tanto, la conformación tridimensional de las proteínas y su estabilidad se ven influida no sólo por la concentración, sino por la clase de iones presentes y de hecho, son los aniones los que tienen una mayor influencia que los cationes (Badui, 2006).

La capacidad de las sales para provocar el ordenamiento del agua a su alrededor, lo que produce un cambio en las propiedades de hidratación de las moléculas de proteína y en la estructuración de la interfase agua-proteína. Damodaran (1982), indica que las sales que mejor estabilizan son las que

promueven la hidratación de las proteínas y que se unen a ellas de forma débil. Por el contrario, las que se unen fuertemente a las proteínas desestabilizan porque no logran hidratarlas eficientemente. El mecanismo involucra la capacidad de las sales para promover el ordenamiento de las moléculas del agua que no está íntimamente ligada a la matriz de las proteínas sino al agua que se encuentra en el seno del líquido rodeando a la proteína, por la formación de puentes de Hidrógeno a su alrededor, lo que promueve la estabilización de las proteínas. En contraste, las sales que desnaturalizan a las proteínas rompen la estructuración del agua convirtiéndola en un mejor solvente para las moléculas apolares. En otras palabras, el efecto desnaturalizante de las sales caotrópicas está relacionado con la desestabilización de las interacciones hidrofóbicas intramoleculares y la estabilización de esas zonas hidrofóbicas ahora expuestas con las moléculas de agua y las sales que rompen estructura. El efecto neto en la solubilidad de las proteínas dependerá de la naturaleza de la proteína y de la sal utilizada.

Los polifosfatos usados como aditivos, constituyen una gama de productos denominados "retenedores de agua" pues son polielectrolitos que se encuentran fuertemente cargados negativamente por lo que atraen moléculas de agua facilitando su retención. El equilibrio entre agua libre y ligada se desplaza en función de las condiciones del medio. Los polifosfatos actúan como secuestrantes, mediante los complejos Ca^{2+} y Mg^{2+} influyendo así en la retención de agua, pues complejan las cationes disminuyendo sus enlaces, abren las cadenas peptídicas y el medio se hidrata. Los fosfatos alcalinos ayudan a retener el agua que exuda en los ciclos de congelación-descongelación.

La función de estos aditivos está relacionada con la reducción de las mermas por pérdida de fluido de la carne. Fueron introducidos hacia finales de la década del 60 para reducir la formación de gelatina en los jamones enlatados, pero posteriormente su uso se generalizó a la mayoría de los productos cárnicos.

Los polifosfatos son productos de condensación química de unidades de ortofosfato $(\text{PO}_4)^{3-}$, para formar cadenas que contienen dos (pirofosfato), tres (tripolifosfato) y hasta más de 100 átomos de fósforo.

Se conoce que el polifosfato realmente efectivo para lograr el resultado antes descrito es el pirofosfato $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$. Cuando se usan polifosfatos de mayor grado de condensación, como el

tripolifosfato o el hexametafosfato, estos sufren hidrólisis paulatina en la carne hasta producir pirofosfato, que es el agente activo en el aumento de la capacidad de retención de agua.

1.3.5.1 Pirofosfatos

El uso del pirofosfato en la elaboración de jamones se ve limitada por su baja solubilidad en salmueras, por lo que se usa siempre en mezclas con tripolifosfato, que es el más empleado por ser más soluble, y con hexametafosfato, también bastante soluble. Solamente los fosfatos alcalinos son efectivos para aumentar la capacidad de retención de agua de la carne. Los fosfatos ácidos pueden reducir el pH y provocar una mayor exudación

Los pirofosfatos y tripolifosfatos simulan el efecto del ATP y son capaces de romper los puentes entre los filamentos de actina y miosina. Son solubilizadores especialmente potentes de la actomiosina y parece que existe una relación más o menos directa entre la CRA y la solubilidad de la actomiosina. Cuando se adicionan a la carne, incrementa la CRA. Como estas sales son también eficaces agentes formadores de complejos con los iones calcio, se ha sugerido que el efecto de los fosfatos sobre la CRA se debe a la eliminación del calcio de los tejidos (Wierbiski, 1963).

Las propiedades de los fosfatos han permitido su utilización en casi todos los alimentos. Dentro de estas propiedades están el aumento en retención de agua ya que incrementa el pH del músculo post-rigor. La mayoría de los fosfatos aumentan el pH de la carne, sin embargo la relación entre la presencia de fosfatos y la capacidad de retención de agua varía con los diferentes fosfatos. Entre los fosfatos inorgánicos aprobados por el USDA/FSIS para el uso en productos cárnicos encontramos el tripolifosfato mono, di y tri sódico, el hexametafosfato de sodio, el tripolifosfato mono, di y tri potasio; el tripolifosfato de sodio que es muy utilizado en productos cárnicos por su alta capacidad de retención de agua y aumento de pH (Knipe 2004). Una acción que realizan los fosfatos es la elevación del pH y la fuerza iónica, así como un intercambio específico con la proteína muscular fibrilar. Estos favorecen el proceso de emulsión, ya que estimulan la dispersión molecular (Fisher, 1994).

El uso de fosfatos protegen la emulsión de los productos de los efectos en variaciones en temperatura, cocción y así mismo se vuelven muy valiosos en la producción de productos cárnicos bajos en sodio (Knipe, 2004). Los fosfatos por su naturaleza tienen una acción conservadora, especialmente los polifosfatos, impiden o retrasan el proceso de oxidación

de las grasas insaturadas de los sistemas alimentarios he inhiben el crecimiento de muchos microorganismos presentes. Esta propiedad se debe a la fijación de iones metálicos o polielectrolitos necesarios para la oxidación de las grasas o para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos (Fisher, 1994).

El cloruro de sodio o sal común es uno de los ingredientes básicos y esenciales en toda mezcla curante, y ha venido utilizándose como preservante desde tiempos prehistóricos. Su efecto preservante es doble: por una parte, reduce la actividad de agua del medio, para lo cual es sumamente eficaz, comparada con otros solutos, pero además tiene *per se* un efecto inhibitor de los microorganismos. Por otra parte, el aumento de la concentración de cloruro de sodio en la carne, causa una reducción en la actividad de agua de la misma. Es por eso que, a una concentración suficientemente alta de sal, se inhibe el crecimiento microbiano y el posterior deterioro de la carne curada.

Añadiendo cloruro sódico a la carne se puede cambiar el punto isoeléctrico hacia menores pH, y a valores de pH mayores de 5, la presencia de sal da lugar a un incremento de la capacidad de retención de agua (Schut, 1976). Por otra parte la sal incrementa la solubilidad de las proteínas del músculo y la CRA. La adición de sales afecta también el número total y relativo de grupos cargados de los filamentos. El cloruro de sodio aumenta la CRA e hinchamiento de la carne, cuando el pH se encuentra del lado alcalino del punto isoeléctrico.

1.3.5.1.1 Funciones

Neutralizar la cruz de enlace entre la actina y la miosina, formada durante el rigor mortis, y el apoyo de la disociación del complejo actomiosina en fibras se vuelven a separar. Fosfatos aflojar las fuerzas electrostáticas en el complejo actomiosina, esta función de fosfatos que se conoce como el "efecto específico sobre la proteína muscular, ya que contribuye en gran medida a la solubilidad de la proteína muscular.

Los fosfatos solo son capaces de actuar por separado en la actina y miosina después del rigor mortis y esa es la razón principal del uso mundial de fosfatos. La separación de la actina y la miosina se lleva a cabo como resultado de la unión de los iones fosfato con carga negativa con la carga positiva Mg^{2+} o Ca^{2+} . El Mg^{2+} con carga positiva y los iones Ca^{2+} juega un papel vital en la contracción muscular, así como la relajación y están presentes en el punto

donde la unión entre la actina y la miosina se produce mediante el bloqueo de la miosina en la actina. A través de la adición de sal, así como los fosfatos, al mismo tiempo a un producto cárnico, la proteína muscular se convierte en solubles y solubilizados, o activado. La proteína puede inmovilizar a los altos niveles de agua añadida como así como emulsionar una gran cantidad de grasa, dado que la proteína de la carne activada es un excelente emulsionante de grasas.

Casi todos los fosfatos, así como mezclas de fosfatos, utilizados en la industria de procesamiento de carne, son los fosfatos alcalinos y la adición de fosfatos alcalinos a la carne ligeramente ácido conduce a un aumento en el pH en el interior del producto cárnico. Una diferencial mayor del punto isoeléctrico se desarrolla y mejora de estabilidad proteica es el resultado porque las fuerzas de repulsión electrostática una mayor creación de grandes brechas entre la actina y la miosina produce una mayor cantidad de agua añadida (agua captada). Los fosfatos son ligeramente bacteriostáticos y el crecimiento de las bacterias es ligeramente más lento. Esta desaceleración del crecimiento, sin embargo, es casi insignificante en los productos cárnicos como la concentración de fosfatos necesarios para mostrar el resultado de un impacto significativo sobre el crecimiento de bacterias sería muy superior a la permitida. Los fosfatos pueden enlazar iones de metales pesados y por lo tanto retrasar el proceso de la rancidez en forma de iones de metales pesados son los materiales pre-oxidante. Los tipos de sales de fosfato, están en función de su estructura (Figura 22) y cadenas lineales de unidades de metafosfato (NaPO_3), el valor de pH de la muestra dependerá de la concentración y tipo de sal.

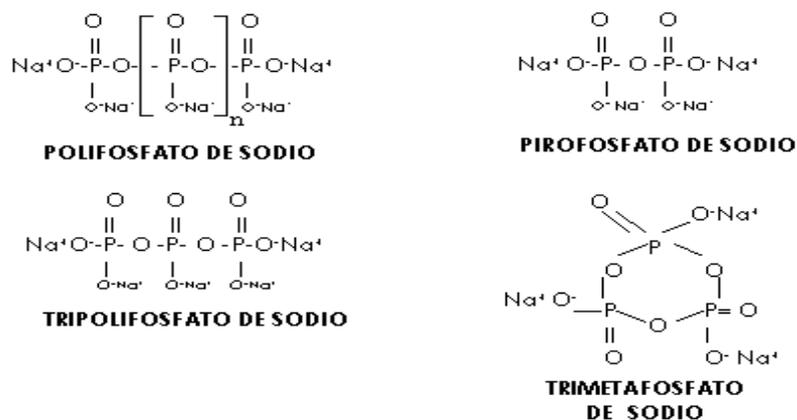


Figura 22. Estructura de las diferentes sales de sodio (<http://www.aditivosalimentarios.com>)

En general, las mezclas de fosfato de embutidos emulsionados presentan un valor de pH entre 7.0 y 8.3, mientras que los fosfatos de las salmueras de jamón presentan un valor de pH alrededor de 9,0-9,3. Todos los productores de fosfato de grandes ofrecen una amplia gama de mezclas de fosfato para todas las aplicaciones posibles. Hay un fuerte efecto sinérgico entre la sal y fosfatos en lo que respecta a la activación de la proteína de la carne *post rigor*.

1.3.6 Modelo de rehidratación de Peleg

El proceso de absorción de humedad está dado por:

Material seco (s) + humedad (L) \longleftrightarrow humedad del solido (s – L)

Si M_t ($\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g Sólido Seco}}$) representa la masa de la humedad en la unidad de masa de solido seco del material al tiempo (t) hasta alcanzar el equilibrio. Asumiendo que el proceso sigue una pseudo-cinética de segundo orden, la tasa de absorción de humedad con respecto al tiempo se puede escribir como:

$$\frac{d M_t}{dt} = k (M_e - M_t)^2 \quad (11)$$

Donde k es la constante de velocidad. Integrando la ecuación 11 la cinética puede ser dada por:

$$\frac{1}{M_e - M_t} = \frac{1}{M_e - M_o} + kt \quad (12)$$

Para un material completamente seco, en $t = 0$, $M_o = 0$, la ecuación 12 se reduce a cinética de segundo orden, reportado para los sistemas de adsorción sólido / líquido.

$$\frac{1}{M_e - M_t} = \frac{1}{M_e} + kt \quad (13)$$

Para un material sólido con un contenido de humedad inicial de M_o , el máximo de humedad adsorbida sólo durante el proceso de rehidratación, M_e , se puede escribir como:

$$M_{e,actual} = M_e - M_o \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación 11 en la ecuación 12 tendríamos:

$$\frac{1}{M_e - M_t} = \frac{1}{M_{e,actual}} + kt \quad (15)$$

La forma potencial de la ecuación 15 se puede terne mediante el reordenamiento:

$$M_t = \frac{M_e + M_e M_{e,actual} (kt - M_{e,actual})}{1 + M_{e,actual} kt} \quad (16)$$

La constante de velocidad para la cinética (k), la absorción de humedad de equilibrio, y la capacidad máxima de absorción de humedad, M_e , puede ser determinada por una regresión lineal de $1 / (M_e - M_t)$ respecto al tiempo (t) utilizando la Ec. 11 se pueden obtener por regresión lineal usando la Ec. 13. Presentación de la M adsorbida, parámetro que se refiere a la masa de humedad adsorbida en cualquier momento durante la rehidratación, que es independiente del contenido de humedad inicial tenemos:

$$M_{adsorbida} = M_t - M_o \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación 17 en la 15, la cinética para la adsorción de humedad puede ser dada por (Resio et al., 2006):

$$\frac{1}{M_e - M_{adsorbida}} = \frac{1}{M_e} + k_v t \quad (18)$$

La ecuación 18 puede linealizarse (Ho and McKay, 2000):

$$\frac{t}{M_{adsorbida}} = \frac{1}{k_v M_e^2} + \frac{1}{M_e} \quad (19)$$

Entonces la forma potencial puede escribirse como:

$$M_{adsorbida} = \frac{k_v M_e^2}{1 + k_v M_e} \quad (20)$$

A partir de la Ec. (20), cuando, tiempo, $t = 0$, la velocidad de absorción de humedad inicial, (V), es dado por:

$$V = k_v M_e^2 \quad (21)$$

La velocidad de reacción inicial en la ecuación. (21) difiere de la reacción inicial reportada para los sistemas de adsorción sólido / líquido (McKay, 2000), ya que varía con el contenido de humedad inicial en el sólido material.

A partir de las ecuaciones. (17) y (20), por lo que el contenido de humedad en la seca material sólido en cualquier momento, t se puede calcular utilizando:

$$M_t = M_o + \frac{k_v M_e^2}{1 + k_v M_e} \quad (22)$$

Dividiendo el numerador y el denominador del segundo término en el lado derecho de la ecuación. (22) por $k_v M_e^2$ e, la cinética de segundo orden se modifica a:

$$M_t = M_o + \frac{t}{\frac{1}{k_v M_e^2} + \frac{t}{M_e}} \quad (23)$$

Aplicando la cinética de rehidratación de Peleg (Peleg, 1988):

$$M_t = M_o + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (24)$$

Donde k_1 y k_2 son constantes de la Peleg y están relacionados con la constante de velocidad y la capacidad de absorción hasta el equilibrio, respectivamente:

$$k_1 = \frac{1}{k_v M_e^2} = \frac{1}{V} \quad (25)$$

$$k_2 = \frac{1}{M_e} \quad (26)$$

La teoría de rehidratación según Peleg, parte de una cinética de segundo orden y se puede emplear para predecir la capacidad de absorción de humedad, la constante de velocidad y la humedad de equilibrio.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Objetivo general

Evaluar el proceso de rehidratación de pechuga de pavo liofilizada con diferentes soluciones de fosfato, mediante algunos parámetros físicos (color, dureza) fisicoquímicos (a_w , CRA, pH) para la obtención de un modelo matemático.

2.2 Objetivos particular

- 1.- Evaluar el efecto de la concentración y tipo de sales (tripolifosfato y pirofosfato de sodio), en la rehidratación de pechuga de pavo liofilizada, sobre algunos parámetros físicos (color y dureza), y fisicoquímicos (a_w , CRA, pH), para seleccionar la solución reconstituyente más adecuada.
- 2.- Evaluar el efecto de la geometría en la liofilización de pechuga de pavo y en la rehidratación de la misma, mediante parámetros físicos (color y dureza), y fisicoquímicos (a_w y CRA), para seleccionar la geometría más adecuada para el proceso liofilización-rehidratación.
- 3.- Evaluar el efecto de las condiciones de rehidratación de pechuga de pavo liofilizada mediante la aplicación del modelo matemático de Peleg para fundamentar los fenómenos de transferencia de masa aplicados al proceso liofilización-rehidratación.

2.3 Hipótesis

Las soluciones de fosfato favorecen la interacción del agua en el sistema cárnico durante la rehidratación, actuando además como amortiguadores, por tanto, las sales de pirofosfato de sodio a una concentración de 0.7% favorecerá más en respuesta de algunos parámetros físicos y fisicoquímicos.

2.4 Justificación

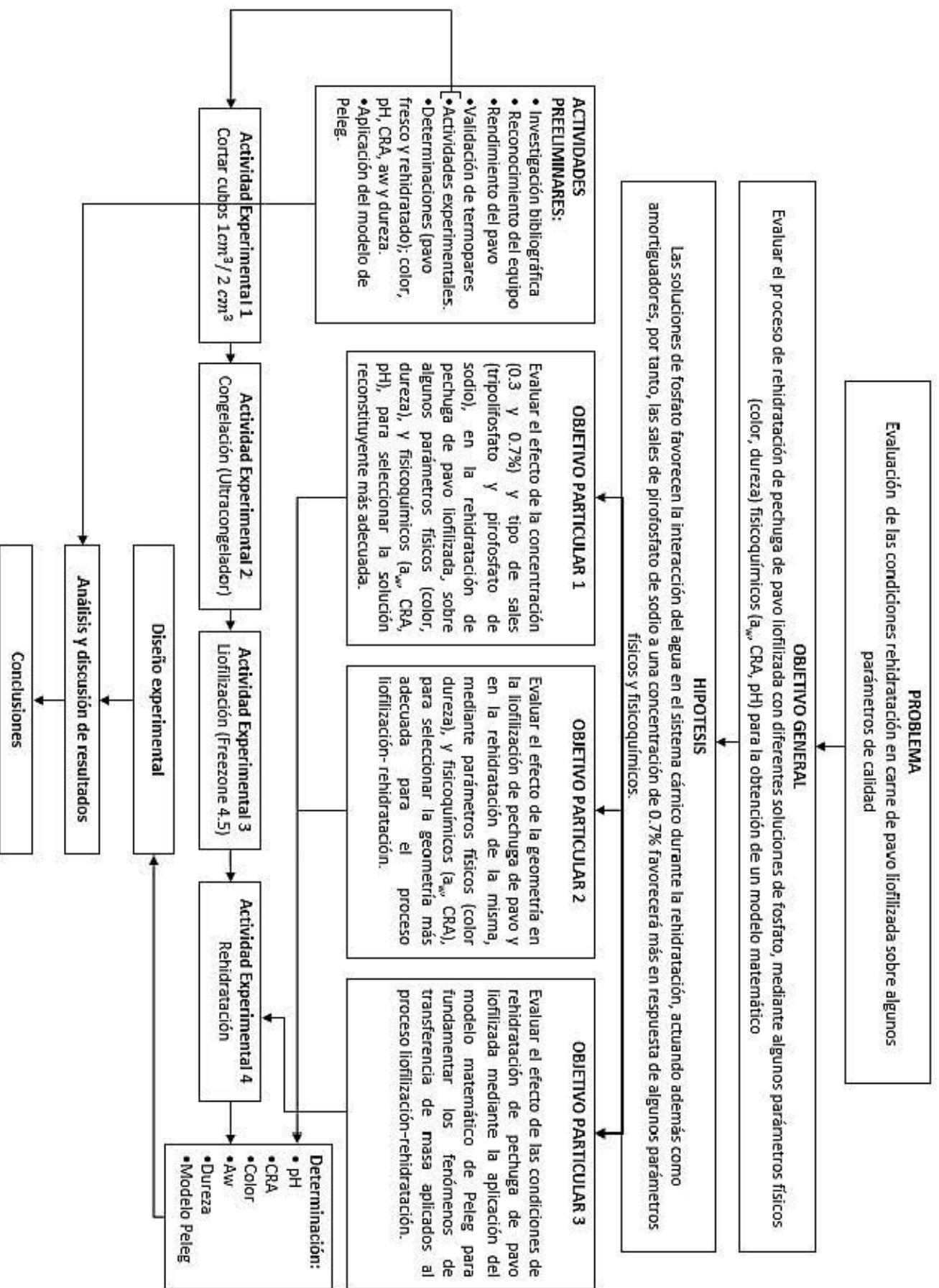
La demanda de carne y productos cárnicos de pavo va aumentando gradualmente, según cifras de SAGARPA en el año 2015 se produjo cerca 124,000 toneladas de carne de pavo, de lo cual más del 70% de dicha producción corresponde al periodo octubre- diciembre, esto representa un incremento del 2% respecto al año 2014 y un incremento del 4% referente a años anteriores. De acuerdo a la información anterior, es indispensable emplear técnicas de conservación de carne y productos cárnicos que puedan conservarse en periodos mayores a 12 meses, con la finalidad de

cubrir la demanda del consumidor produciendo carne durante todo el año y no únicamente el último trimestre de cada año.

Por otra parte, y en relación a la conservación de la carne mencionada líneas atrás, es importante determinar el efecto que tiene la liofilización-rehidratación en los parámetros físicos (color, dureza) y fisicoquímicos (pH, CRA y a_w) ya que en la literatura se plantea que un producto liofilizado puede restaurar su estado inicial, pero durante el proceso el alimento sufre daños por congelación, durante la liofilización, ya que se extrae agua de estructura, lo que modifica y daña al alimento.

Un producto liofilizado puede almacenarse durante periodos muy amplios y en condiciones climáticas normales (no requiere refrigeración, ni congelación siempre y cuando se mantenga un empaque con sello hermético) debido a su baja actividad de agua, como se ha mencionado. Al consumir este tipo de producto cárnico, por cuestiones sensoriales, es necesario emplear un método adecuado de rehidratación, en donde las condiciones de temperatura, tiempo, geometría, tamaño y solución de reconstitución sean las más adecuadas para este proceso, lo que es parte de objeto de estudio de este trabajo, para de esta manera, fundamentar la relación que existe en los parámetros físicos, fisicoquímicos y matemáticos (modelo predictivo de rehidratación) mencionados anteriormente con el fenómeno de liofilización- rehidratación. Con la finalidad de contribuir con esta investigación al avance informativo sobre dichos fenómenos aplicados a la carne de pavo y esperando se pueda emplear de apoyo en el desarrollo y/o formulación de proyectos similares, conociendo ya las ventajas, desventajas y limitantes al manipular las mismas variables en dichos procesos de transformación.

2.5 Condensado de la metodología experimental



2.6 Descripción de la metodología experimental

2.6.1 Actividades preliminares

2.6.1.1 investigación bibliográfica

Se realizó una investigación principalmente bajo fuentes primarias y secundarias, constituyendo elementos fundamentales para responder a un planteamiento metodológico, análisis y discusión de resultados, así como de apoyo para las conclusiones planteadas en este proyecto.

2.6.1.2 Reconocimiento de equipo

Se realizó reconocimiento del equipo de liofilización y congelación, con la finalidad de conocer el modo y las condiciones en que operan. De igual modo, se hizo el reconocimiento del control de temperaturas, potenciómetro, higrómetro, centrifuga, espectrofotómetro y penetrómetro, para poderlos emplear de manera apropiada en las determinaciones planteadas en el condensado de la metodología experimental.

2.6.1.3 Rendimiento del pavo

Se contabilizó el número de muestras que se podían obtener realizando cortes de 1 y 2 cm³ en 1 kg de pechuga de pavo, con la finalidad de determinar la cantidad de carne necesaria para poder realizar el proyecto considerando la cantidad de muestras que se emplearían tanto para las repeticiones como para las réplicas.

2.6.1.4 Validaciones de termopares

La validación se llevó a cabo empleando un termómetro de mercurio y el control de temperaturas digital (GENERAL DT4208SSD) con termopares tipo K (cromel/alumel). Se realizó registrando la temperatura cada minuto, tanto de los termopares, como del termómetro de mercurio, para posteriormente graficar Termopar vs Termómetro y obtener la linealización y la respectiva corrección de cada termopar. La validación se realizó tomando una temperatura inicial de 5°C y se registró el ascenso de la misma en intervalos de 1 min, hasta alcanzar una temperatura máxima de 68°C.

2.6.2 Actividades experimentales

2.6.2.1 Actividad experimental 1. Obtención y corte de carne

Materia prima: La pechuga de pavo se obtuvo de un rastro ubicado en Santa María Tianguistengo, Cuautitlán, Estado de México. La edad del pavo antes del sacrificio fue 18 semanas con un intervalo de peso de 20 – 27 kg. La carne de pavo fue transportada desde el proveedor hasta el laboratorio con un tiempo menor a 24 horas después del sacrificio. Se almacenó a 1°C. Se cortaron muestras de 1 y 2 cm³ (Figura 23) determinando la geometría mediante un vernier.

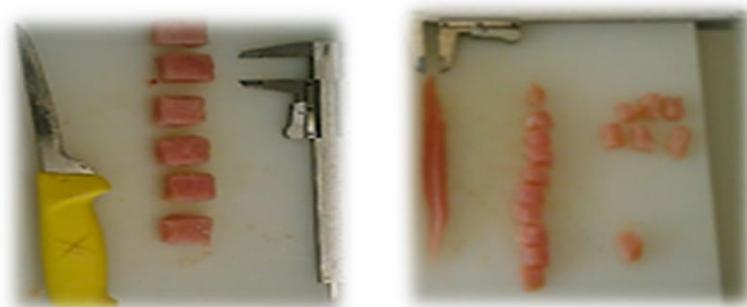


Figura 23. Corte de pechuga de pavo, 2 cm³ (izquierda) y 1 cm³ (derecha)

2.6.2.2 Actividad experimental 2. Congelación

Las muestras previamente cortadas y refrigeradas se procedieron a congelarlas en un Ultra congelador de la marca REVCO modelo ULTIMA II (Figura 24) por un tiempo aproximado de 24h a una temperatura de -50°C.



Figura 24. Ultracongelador REVCO modelo ULTIMA II

2.6.2.3 Actividad experimental 3. Liofilización

La liofilización se llevó a cabo en una liofilizadora modelo freezezone 4.5 de la marca LABCONCO (Figura 25), en un tiempo de 24h a una presión de 0.035 mbar y temperatura de colector de -49°C .



Figura 25. Liofilizadora freezezone 4.5

2.6.2.4 Actividad experimental 4. Rehidratación

Las muestras liofilizadas se rehidrataron en pirofosfato tetra sódico y tripolifosfato de sodio en concentraciones de 0.3% y 0.7% en un tiempo de 7.5 min, donde se controló la temperatura de la solución a 40°C empleando un control de temperatura digital modelo DT4208SD (Figura 26).

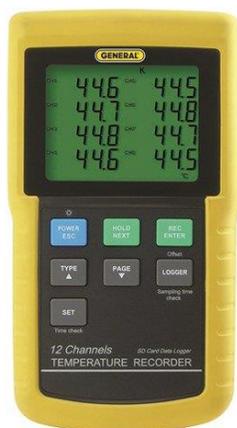


Figura 26. Control de temperatura GENERAL DT4208SD.

2.6.3 Determinaciones

Se realizaron pruebas físicas; color y dureza, y fisicoquímicas; a_w , CRA y pH (la metodología se describe a continuación), tanto a la muestra fresca (pechuga de pavo), como a la liofilizada rehidratada con agua destilada (partiendo de las actividades experimentales 1-4), con la finalidad de referenciar los valores de estos parámetros con los valores obtenidos a partir de las determinaciones realizadas a las diferentes corridas experimentales.

2.6.3.1 Potencial hidrógeno (pH)

Se determinó el pH tanto al producto fresco como al liofilizado rehidratado utilizando un potenciómetro Oakton (USA) (Figura 27). Empleando la metodología 981.12 del AOAC (1991).



Figura 27. Potenciómetro Oakton

Previo a la medición de pH, se calibró el potenciómetro con un buffer pH 4 y 7, utilizando la cantidad necesaria de buffer para cubrir el bulbo del electrodo (revisando siempre la fecha de caducidad de los buffers) en un vaso de precipitado para evitar la contaminación del buffer contenido en el envase original. La periodicidad de la calibración se realizó de acuerdo a la estabilidad que mostró el potenciómetro referente a las condiciones en las que se trabajó.

Ya calibrado el potenciómetro, se pesaron 10 g de carne fresca y se colocaron en un vaso de la licuadora 90 mL de agua destilada y se licuaron por 1 min. Posteriormente, se filtro la suspensión de carne en una manta de cielo para eliminar el tejido conectivo. Se realizó la medición del pH por triplicado.

2.6.3.2 Actividad de agua (a_w)

Para a_w se empleó un higrómetro de punto de rocío marca Decagon Devices modelo Pawkit (USA) (Figura 28), tanto para la pechuga de pavo fresca, como a la pechuga de pavo liofilizada rehidratada. La metodología que se siguió fue la del método oficial 978.18 AOAC 1991.

Previo a la medición se realizó la calibración del equipo colocando dentro de la caja Petri de metal la sal de calibración (LiCl 13.4 molal) 0.76. Se calibro el equipo de forma ascendente y descendente de acuerdo a los intervalos con los que se estimó teóricamente el valor de las muestras.

Las muestras de carne se cortaron en placas de aproximadamente 5 mm de espesor de tal forma que se cubrió la caja Petri donde se tomó la lectura. La prueba se realizó por triplicado para cada tratamiento.



Figura 28. Higrómetro de punto de rocío marca Decagon Devices modelo Pawkit

2.6.3.3 Capacidad de retención de agua (C.R.A)

La Capacidad de retención de agua se llevó a cabo siguiendo la metodología del AOAC 973.08-1992 (capacidad de retención de agua por aplicación de una fuerza centrífuga) en una centrífuga marca Centurion Mod. K2015R (Figura 29)

Se pesó 1 g de carne colocándolo en papel filtro de dimensiones aproximadas de 2 x 2 cm (previamente pesados), posteriormente se colocaron dentro de los tubos para centrifuga, la cual trabajó bajo las siguientes condiciones: temperatura de 8°C, tiempo de 15min, fuerza centrífuga relativa (RCF) : 15,000 g.

Las muestras fueron retiradas de la centrifuga y se pesaron por separado la carne y el papel para así registrar su medición, la prueba se realizó por replica (3) y repetición (3)



Figura 29. Centrifuga marca centurion mod K2015R

2.6.3.4 Color

La determinación del perfil de color se llevó a cabo siguiendo la metodología de AMSA (2012) mediante un espectrofotómetro de reflectancia, Konika Minolta CM 600d (Figura 30):

- Tamaño de apertura: 8mm.
- Angulo de observación: 10°.
- Método de estandarización: conforme a CIE N°15, ISO 7724/1, DIN 5033 parte 7, ASTM E 1164 y JIS Z 8722.
- Software colector de datos: Spéctra Magic NX.
 - Valores tri-estímulo: De acuerdo al sistema CIE (L*,a* y b*)
 - Intervalo de longitud de onda: 400 a 700 nm
 - Respuesta: % Reflectancia
 - Número de lecturas por muestra: 1



Figura 30. Espectrofotómetro de reflectancia, Konika minolta c/m 600

Posterior a la calibración del instrumento, las muestras se adecuaron para tomar las lecturas, por lo que los cubos de carne (fresca o liofilizada-rehidratada) se colocaron individualmente en una celda de cuarzo anti reflejante, dejando reposar la muestra refrigerada por al menos 30 min para que se oxigenara la mioglobina (algunos laboratorios recomiendan estandarizar el tiempo de *blooming* a 1 hora, teniendo la muestra expuesta al aire y una temperatura de 3°C), evitando cualquier presión que distorsione la dirección de las fibras musculares.

El número de repeticiones realizadas fue una por muestra y se realizó por triplicado. Los valores se registraron de acuerdo a los parámetros L*, a* y b*; y el pH.

2.6.3.5 Resistencia a la deformación.

Para la medición de la resistencia a la deformación de la carne, el método más ampliamente utilizado es la determinación de esfuerzo o resistencia al corte, basado en lo propuesto por Bratzler (1949). La determinación de la dureza se realizó siguiendo la metodología de Hoinikel (1996) utilizando un penetrómetro, marca Fruit Pressure Tester. Modelo FT327 (Italia) (Figura 31).

Para esta prueba, se cortaron placas de carne de aproximadamente 1 cm de espesor y se colocaron las muestras dentro de cajas Petri, refrigerándolas en un intervalo de temperatura de entre 1 – 4°C. La puntilla del penetrómetro empleada fue la de 8mm.

La medición obtenida a partir del penetrómetro, se dividió entre el área de la puntilla (8mm) para obtener datos de dureza.



Figura 31. Penetrómetro, fruit pressure tester. Modelo FT327

2.6.4 Aplicación del modelo de Peleg

El modelo matemático aplicado para predecir el comportamiento para la rehidratación fue el de Peleg:

$$M_t = M_o + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (27)$$

Donde M_t representa la ganancia de peso a un tiempo determinado (g. de agua / g. de sólido seco), M_o es el peso inicial, t es el tiempo y k_1 y k_2 son las constantes de Peleg. Para determinar el valor de las constantes (k_1 y k_2), se linealizó la gráfica de tiempo de rehidratación vs ecuación 25. Posteriormente, de la ecuación $y = mx + b$ se obtuvo el valor de las constantes, donde el valor de la ordenada al origen y el valor de la pendiente representan k_1 y k_2 respectivamente.

$$\frac{t}{X_t - M_o} \quad (28)$$

Donde t representa el tiempo en el que es medido X_t (peso de la muestra a un tiempo dado).

2.7 Diseño experimental

Para el tratamiento de datos se aplicó el software estadístico minitab 16.0.1 en donde se seleccionó un diseño factorial 2^k . Las variables empleadas fueron 3:

- Tipo de sal: 2 niveles (Pirofosfato, Tripolifosfato)
- Concentración de sales: 2 niveles (0.3 %, 0.7 %)
- Tamaño de geometría: 2 niveles (1 cm^3 , 2 cm^3)

Originando 8 corridas de 3 repeticiones dando un total de 24 corridas experimentales de acuerdo al diseño estadístico (Cuadro 3).

Cuadro 3. Diseño experimental

O.E.	O.C.	TIPO DE SAL	CONC	DIMN	ph	% C.R.A.	Dureza	a_w	k_1	k_2	$L^*(A)$	$a^*(A)$	$b^*(A)$
17	1	Pirofosfato	0.3%	1 cm^3	6.38	21.14	3.4	0.90	0.35	0.23	49.28	4.48	10.95
21	2	Pirofosfato	0.3%	2 cm^3	6.18	8.41	5.2	0.86	0.91	0.58	53.48	8.26	17.99
23	3	Pirofosfato	0.7%	2 cm^3	6.42	7.38	4.8	0.88	0.99	0.62	54	9.24	17.05
19	4	Pirofosfato	0.7%	1 cm^3	6.68	16.03	3.0	0.91	0.32	0.24	48.82	3.39	11.29
18	5	Tripolifosfato	0.3%	1 cm^3	6.41	15.77	3.2	0.94	0.44	0.26	47.84	3.81	12.18
3	6	Pirofosfato	0.7%	1 cm^3	6.62	16.08	2.9	0.92	0.32	0.23	49.27	3.59	9.87
9	7	Pirofosfato	0.3%	1 cm^3	6.44	20.45	3.3	0.89	0.37	0.22	47.56	4.59	12.84
6	8	Tripolifosfato	0.3%	2 cm^3	6.28	9.03	4.5	0.84	0.11	0.61	52.4	7.19	15.44
8	9	Tripolifosfato	0.7%	2 cm^3	6.44	7.56	3.9	0.89	1.15	0.59	51.71	7.42	17.62
16	10	Tripolifosfato	0.7%	2 cm^3	6.40	7.44	4.3	0.87	1.02	0.6	54.61	7.68	16.48
12	11	Tripolifosfato	0.7%	1 cm^3	6.72	16.59	2.8	0.96	0.4	0.3	48.7	3.65	12.12
14	12	Tripolifosfato	0.3%	2 cm^3	6.25	8.89	4.8	0.86	0.87	0.65	56.02	6.72	17.05
2	13	Tripolifosfato	0.3%	1 cm^3	6.44	15.71	3.1	0.91	0.42	0.28	48.86	3.84	11.73
5	14	Pirofosfato	0.3%	2 cm^3	6.10	8.55	5.1	0.83	0.92	0.57	53.5	8.56	17.08
7	15	Pirofosfato	0.7%	2 cm^3	6.38	7.27	4.9	0.86	1.05	0.6	53.19	8.81	16.91
24	16	Tripolifosfato	0.7%	2 cm^3	6.38	7.47	4.0	0.85	0.99	0.61	53.78	7.54	16.94
15	17	Pirofosfato	0.7%	2 cm^3	6.35	7.26	4.7	0.84	0.98	0.61	52.78	8.93	16.95
20	18	Tripolifosfato	0.7%	1 cm^3	6.74	17.05	2.8	0.95	0.41	0.28	48.64	3.48	13.56
22	19	Tripolifosfato	0.3%	2 cm^3	6.27	8.91	4.3	0.85	0.94	0.57	54.09	6.81	17.46
4	20	Tripolifosfato	0.7%	1 cm^3	6.71	16.75	2.9	0.94	0.42	0.29	48.5	3.56	9.83
10	21	Tripolifosfato	0.3%	1 cm^3	6.42	15.66	3.2	0.91	0.43	0.27	48.27	3.89	11.84
11	22	Pirofosfato	0.7%	1 cm^3	6.65	16.04	3.0	0.93	0.33	0.23	48.51	3.57	10.29
13	23	Pirofosfato	0.3%	2 cm^3	6.12	8.39	4.9	0.85	0.91	0.59	51.01	7.59	17.09
1	24	Pirofosfato	0.3%	1 cm^3	6.41	20.91	3.4	0.91	0.36	0.23	48.3	4.56	11.33

En el Cuadro 3 se observan los resultados de las determinaciones realizadas a las 24 corridas experimentales, donde cada repetición se realizó por replicas (5).

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Actividades preliminares

3.1.1 Validación de termopares

Al realizar la validación, los 4 termopares mostraron un comportamiento similar tanto entre ellos (Figura 32) como el que mostro el termopar de mercurio, por lo que los termopares guardan una relación lineal sobre el intervalo de temperaturas del sistema de sobre el cual se trabajó.

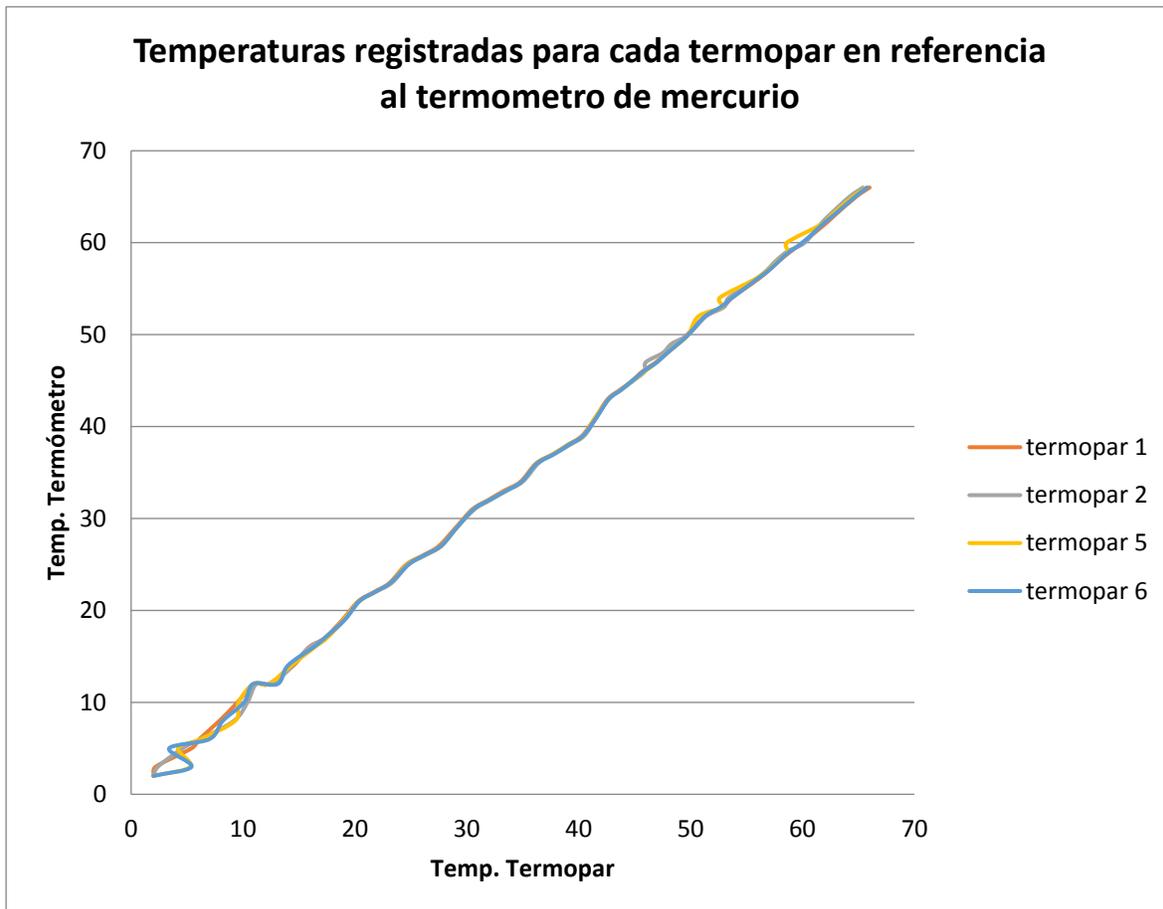


Figura 32. Linealización de termopares

De acuerdo al gráfico de la Figura 32 se puede determinar que la velocidad de respuesta de medición de los 4 termopares empleados es similar al de la medición realizada por el termómetro de mercurio. Una vez realizada la linealización, se obtuvieron las respectivas ecuaciones de corrección referentes a cada termopar (Cuadro 4).

Cuadro 4. Ecuaciones para la corrección de los termopares

Termopar	Ecuación de corrección
1	$0.99994 (x) + 0.043$
2	$1.0093 (x) + 0.3282$
5	$1.013 (x) + 0.4617$
6	$1.0071 (x) + 0.3408$

Los valores tanto de la ordenada como los de la pendiente son muy similares entre sí, lo que nos proporciona tener un control preciso para cada una de las lecturas en los cuatro puntos donde fueron colocados los termopares. El factor de corrección para cada termopar fue aproximadamente de 1. En el Cuadro 4 se observa que existe una muy buena correlación lineal entre todos los termopares empleados, además de tener una muy baja dispersión de datos.

3.1.2 Caracterización muestra fresca de pechuga de pavo

3.1.2.1 pH

El pH de las muestras de la pechuga de pavo se obtuvo a partir de la metodología planteada en el apartado 2.6.6. Ya que este parámetro de calidad se encuentra gran parte en función de las condiciones postmortem, es importante mencionar que las muestras se obtuvieron 24 horas después de sacrificio en donde se mantuvo a un intervalo de temperatura de 1-7 °C, posteriormente se transportó en un contenedor adiabático. Al realizar esta determinación se obtuvieron los datos presentados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Determinación de pH al pavo fresco

Muestra	pH	Temp (°C)	Promedio	D.E.	C.V
1	6.04	26.9	6.04	0.005	0.091 %
2	6.05	26.1			
3	6.05	26.4			
4	6.05	26.5			
5	6.04	26.6			

El pH promedio que fue determinado para la pechuga de pavo sin procesar fue de 6.04, lo que se encuentra entre los valores establecidos para la carne de ave en buen estado que

bibliográficamente se encontró el intervalo de 5.8 – 6.2 unidades. La prueba se realizó por replica y estadísticamente los datos son confiables ya que se encuentra un valor de coeficiente de variación por debajo de 1% (Cuadro 5).

3.1.2.2 Actividad de agua

Cuadro 6. Determinación de a_w para pechuga de pavo fresco

Muestra	a_w	Temp (°C)	Promedio	D.E.	C.V
1	0.99	22.4	0.9867	0.0058	0.5 %
2	0.98	23.5			
3	0.99	23.9			

Los valores de actividad de agua para la carne de pavo (Cuadro 6) se encontraron por encima de 0.98 a una temperatura promedio de 23.1 °C, estos valores se encuentran dentro del intervalo encontrado bibliográficamente que es de 0.97 – 0.99 para carne fresca de aves. Los datos son confiables ya que el coeficiente de variación es también menor a 1.

3.1.2.3 Capacidad de retención de agua

Los valores encontrados bibliográficamente para capacidad de retención de agua (Cuadro 7) se encuentran en un intervalo de 20 – 30% para carne fresca de res y cerdo, mientras que para carne de ave se encuentran valores menores que van desde el 15 al 25% debido a su estructura y composición del musculo.

Cuadro 7. Determinación de CRA para pechuga de pavo fresco

Muestra	(%) CRA	% Promedio	D.E.	C.V
1	16.84	17.159	0.343	2 %
2	17.07			
3	17.65			
4	17.07			

De acuerdo al Cuadro 7, los valores determinados experimentalmente son en promedio de 17.15 %, el cual se encuentra dentro de los valores bibliográficamente establecidos.

Las pruebas se llevaron a cabo empleando una fuerza centrífuga y posteriormente se midió el volumen desprendido de la muestra. Estadísticamente se realizaron 4 réplicas donde se obtuvo un coeficiente de variación del 2%.

3.1.2.4 Dureza

La dureza, definida como la propiedad de la textura manifestada por una alta y persistente resistencia a la rotura en la masticación (Jowitt, 1964), se determinó a una temperatura de 26 °C empleando la metodología del apartado 2.6.10. En el Cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos de esta prueba.

Cuadro 8. Determinación de Dureza para pechuga de pavo fresco

Muestra	Dureza (kg _f /cm ²)	Temp	Promedio	C.V
1	1.88	26°C	1.81	3 %
2	1.75			
3	1.88			
4	1.75			
5	1.88			

Bibliográficamente se han encontrado valores para carne de res y cerdo fresca que van desde 1.5 hasta 3 (kg_f/cm²) dependiendo el tipo de corte del cual es medido. Para carne de aves, debido al bajo contenido de tejido conectivo muestran valores por debajo de 2 (kg_f/cm²) por lo que los valores determinados experimentalmente se encuentran dentro de este intervalo, estadísticamente los datos se trataron por réplicas y se obtuvo un coeficiente de 3% (Cuadro 8).

3.1.2.5 Color

De acuerdo al Cuadro 9 podemos observar que estadísticamente los datos obtenidos experimentalmente mediante el espectrofotómetro son confiables debido al bajo porcentaje del coeficiente de variación para cada uno de los estímulos.

Cuadro 9. Determinación estímulos de color $L^*(A)$, a^* y $b^*(A)$

Promedio			C.V.		
$L^*(A)$	$a^*(A)$	$b^*(A)$	$L^*(A)$	$a^*(A)$	$b^*(A)$
43.06	3.25	6.32	2.05%	6.66%	7.88 %

Los valores obtenidos experimentalmente comparados con datos bibliográficos son muy próximos para parámetro a^* de 5.28 y de b^* de 8.41.

Acevedo (2004), determino que los valores promedio de $L^*(A)$ son de 38.14 para carne fresca de pavo. Al comparar los valores representados en el Cuadro 9 con los obtenidos de Acevedo, esta variación puede estar influenciada por el contenido de glucógeno en el tejido muscular, ya que si es bajo, la carne tiende a ser oscura y presentar una estructura compacta y absorber más luz debido a que anaeróticamente se produce poco ácido láctico y consecuentemente, el pH de la carne postmortem se mantiene más alto de lo normal (mayor o igual a 6) y como resultado, se acorta el tiempo de vida útil de la misma.

Brewer 2006, fundamenta las variaciones del perfil de color determinada mediante el sistema CIELAB debido a la exposición de oxígeno de la muestra, lo que se le conoce como *Bloom*. El cambio de color específico que ocurre con este fenómeno depende del contenido del pigmento, así como de las características químicas de músculo, de la concentración del mioglobina y hemoglobina. Durante la exposición de oxígeno y a través de un proceso bioquímico, la mioglobina se reduce y al descender el pH, se produce una alteración de la capacidad de unión del agua con las proteínas, debido a la interacción de los aminoácidos de la superficie con el contenido de agua libre dentro de la misma macromolécula, que a su vez determina la cantidad de luz reflejada dado por el estímulo L^* .

3.1.3 Caracterización muestras liofilizadas rehidratadas con agua destilada.

3.1.3.1 pH

Se determinó el pH de la muestra liofilizada rehidratada (Cuadro 10) con la finalidad de realizar una comparación de la muestra fresca y las muestras liofilizadas rehidratadas con agua destilada y determinar si estas operaciones tienen afectaciones en este parámetro.

Cuadro 10. Determinación pH, muestras liofilizadas RH con agua destilada

Muestra	pH	Temp (°C)	Promedio	C.V
1 (1 cm ³)	6.02	27.1	6.03	10 %
2 (1 cm ³)	6.04	26.5		
3 (1 cm ³)	6.03	26.8		
1 (2 cm ³)	6.01	26.6	6.02	8 %
2 (2 cm ³)	6.03	26.8		
3 (2 cm ³)	6.03	26.7		

De acuerdo al Cuadro 10, se observa que los datos tanto para las muestras de 1 como las de 2 cm³ presentan un coeficiente de variación bajo, por lo que estadísticamente los datos son confiables. Por otra parte, al analizar los valores de la muestra de pechuga fresca se puede determinar que hay un decremento de los valores de este parámetro de 0.02 unidades, por lo que las operaciones unitarias de liofilización- rehidratación afecta de manera insustancial a las muestras. Posiblemente la explicación de este decremento se debe a la congelación.

Estudios realizados por Legoyne (2012) para evaluar el efecto de la conservación en congelación en carne de ave congelada a -20 °C, mostraron un pH menor que el determinado antes de la congelación, esto es debido a que en la etapa 1 del congelamiento que hace referencia al enfriamiento, aún existe actividad enzimática con producción de ácido láctico lo que disminuirá el pH. Es importante mencionar que este decremento puede verse afectado principalmente por la temperatura en la que se realizó la medición. El pH disminuye conforme aumenta la temperatura, por lo que al realizar la comparación de la muestra fresca con la rehidratada, se observa un incremento de 0.04 unidades en la temperatura (dentro de la medición de pH) en las muestras rehidratadas con agua destilada.

3.1.3.2 Actividad de agua (a_w)

En Cuadro 11 se puede observar la determinación de actividad de agua que se realizó a las muestras liofilizadas, rehidratadas con agua destilada para las dos dimensiones propuestas (1 y 2 cm³), la prueba se realizó mediante 3 réplicas por cada dimensión.

Cuadro 11. Determinación de a_w , muestras liofilizadas RH con agua destilada

Muestra	a_w	Temp (°C)	Promedio	C.V
1 (1 cm ³)	0.86	22.8	0.83	3.02 %
2 (1 cm ³)	0.83	23.6		
3 (1 cm ³)	0.81	23.7		
1 (2 cm ³)	0.75	22.6	0.71	8.5 %
2 (2 cm ³)	0.68	23.9		
3 (2 cm ³)	0.72	23.6		

Al observar el Cuadro anterior, se puede inferir que los datos son estadísticamente confiables ya que el porcentaje de coeficiente de variación es menor al 10%. Por otro lado, al analizar el Cuadro 11, se puede observar que las muestras de 2 cm³ muestran valores inferiores a los de 1 cm³, por lo que las muestras de mayor dimensión presentan un menor grado de rehidratación. Al comparar esta determinación, con la realizada a las muestras frescas se aprecia una diferencia de más de 10 y 25 unidades para las muestras rehidratadas de 1 y 2 cm³ respectivamente.

3.1.3.3 CRA

Se realizó la determinación de las muestras de 1 y 2 cm³ (Cuadro 12). Estadísticamente se obtuvieron valores menores al 10 % en cuanto al coeficiente de variación.

Cuadro 12. Determinación de porcentaje de CRA, muestras liofilizadas RH con agua destilada

Muestra	CRA (%)	% Promedio	C.V
1 (1 cm ³)	12.35	12.2	6.97 %
2 (1 cm ³)	11.28		
3 (1 cm ³)	12.96		
1 (2 cm ³)	5.28	5.45	3.79 %
2 (2 cm ³)	5.39		
3 (2 cm ³)	5.68		

Los valores obtenidos de CRA representados en el Cuadro 12 muestran la cantidad de agua que se drena tras la prueba, por lo que para las muestras de 2 cm³ los valores son inferiores en comparación con las de 1 cm³, la explicación está relacionada con el grado de rehidratación, entre menor sea este parámetro, será más el agua ligada a la estructura y menor el agua libre, por lo tanto disminuirá la capacidad de retención de agua que para este caso se expresa en términos de volumen de agua desprendido de la muestra. La prueba se realizó por replica (3) para cada tipo de dimensión.

3.1.3.4 Dureza

Se determinó la dureza de las muestras liofilizada rehidratada con agua destilada (Cuadro 13) para muestras de 1 y 2 cm³. Se obtuvo un bajo coeficiente de variación por lo que los datos son confiables. La prueba se realizó por replica (3 para cada dimensión).

Cuadro 13. Determinación de dureza. Muestras rehidratadas con agua destilada

Muestra	R.D.	Dureza (kg _f /cm ²)	Promedio	C.V
1 (1 cm ³)	4.1	5.13	5	5.25%
2 (1 cm ³)	3.9	4.88		
3 (1 cm ³)	4	5		
1 (2 cm ³)	5.7	7.13	6.83	6.00%
2 (2 cm ³)	5.4	6.75		
3 (2 cm ³)	5.3	6.63		

En el Cuadro 13 se puede apreciar que las muestras que presentan una mayor dureza son las de 2 cm³ con una diferencia de casi 2 kg_f/cm² respecto a las muestras de 1 cm³.

Al comparar este parámetro de calidad con los valores obtenidos de la muestra fresca, se puede observar que hay un incremento en las muestras liofilizadas rehidratadas de hasta 4 kg_f/cm², esto es debido a que al extraer el agua ligada de las muestras durante la liofilización, existe una afectación estructural que repercute en el proceso posterior que es la rehidratación, causando una disminución de su solubilidad (respecto a las proteínas), ya que los residuos hidrofóbicos del interior aparecen en la superficie y a causa de este fenómeno se tienen muestras con menor grado de rehidratación y con mayor interacción entre proteína-proteína dando como resultado valores mayores de dureza.

3.1.3.5 Color

Los resultados de color se aprecian en el Cuadro 14. El sistema de medición empleado para esta determinación fue el sistema CIE Lab donde se realizaron 3 réplicas para cada dimensión (1 y 2 cm³), se obtuvieron promedios por cada estímulo y dimensión. Estadísticamente los promedios son confiables ya que presentan valores bajos de C.V.

Cuadro 14. Determinación del perfil de color. Muestras rehidratadas con agua destilada

Muestra	Medición			Promedio			C.V.		
	L*(A)	a*(A)	b*(A)	L*(A)	a*(A)	b*(A)	L*(A)	a*(A)	b*(A)
1 (1 cm ³)	56.64	7.58	14.99	55.70	8.56	17.38	4.9 %	9 %	9.4 %
2 (1 cm ³)	55.73	8.05	16.08						
3 (1 cm ³)	54.68	7.05	17.1						
1 (2 cm ³)	58.78	10.05	18.99	58.87	9.56	18.71	2.1 %	5.9 %	3 %
2 (2 cm ³)	58.09	9.7	19.08						
3 (2 cm ³)	56.73	8.93	18.05						

Al analizar el Cuadro anterior, se puede apreciar que para los tres estímulos (L*(A), a*(A) y b*(A)) los valores obtenidos para las muestras de 2 cm³ son superiores a las de 1 cm³. Las muestras más hidratadas presentan valores inferiores del estímulo L*(A), una posible respuesta a este fenómeno es que a consecuencia de la deshidratación, al realizar la prueba, el haz de luz emitido por el colorímetro, es absorbido ligeramente en mayor proporción en muestras con mayor grado de rehidratación debido al aumento de volumen de la estructura de las fibras musculares, dando como respuesta valores inferiores del estímulo L*(A), así como la capacidad de retención de agua de las proteínas que a su vez determina la cantidad de luz reflejada (Bendall y Swatland , 1988).

Durante el proceso de liofilización, los cambios estructurales que presentan las muestras son parcialmente irreversibles, al hacer la comparación del estímulo a*(A) (que está relacionado directamente con el color rojo de la carne) de las muestras frescas con las rehidratadas los valores de estas últimas son inferiores. Durante la rehidratación, se pueden presentar reacciones de degradación de pigmentos, reacciones de pardeamiento (enzimático y no enzimático) que dan como resultado valores inferiores tanto en el estímulo a*(A) como en el b*(A).

3.1.3.6 Aplicación del modelo de Peleg

En la Figura 33, se observa el gráfico de la ganancia de agua de las muestras rehidratadas respecto al tiempo. La rehidratación se realizó a una temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 6.5 minutos con mediciones cada muestra cada 30 segundos.

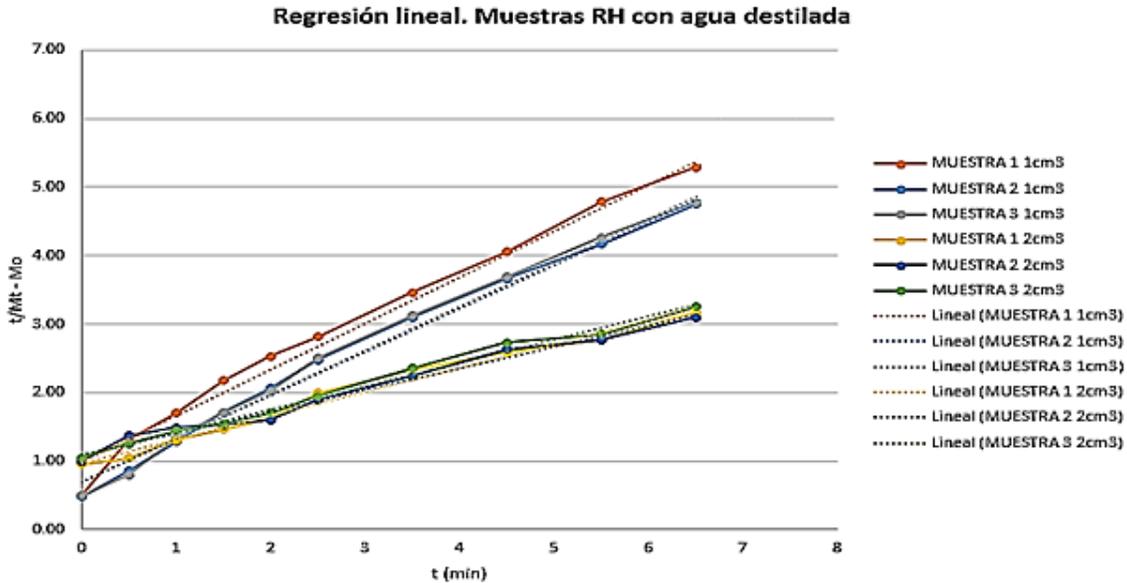


Figura 33. Grafica de ganancia de agua en muestras RH con agua destilada respecto al tiempo.

Al realizar este gráfico se obtuvieron los valores de las constantes k_1 y k_2 (Cuadro 15), se promediaron los valores obtenidos de estos parámetros cinéticos tanto para las muestras de 1 como las de 2 cm^3 . Estadísticamente los datos son confiables debido al bajo coeficiente de variación que presentan. Por otra parte, se puede apreciar que los valores de la constante 1 son inferiores para las muestras de 1 cm^3 , lo que quiere decir que estas muestras llegan más rápido al equilibrio, por lo que los valores de la constante 2 (que involucra la velocidad de rehidratación) serán superiores al de las muestras de 2 cm^3 .

Cuadro 15. Valores de las constantes k_1 y k_2 para muestras rehidratadas con agua destilada

CTES	MUESTRAS 1 cm^3		MUESTRAS 2 cm^3	
	PROMEDIO	C.V.	PROMEDIO	C.V.
k1	0.6976	2.2802	1.0472	6.9289
k2	0.6490	3.2841	0.3337	5.4899
r	0.9894	0.3282	0.9873	0.3886

La Figura 34 muestra el gráfico de M_t del modelo matemático de Peleg respecto al tiempo, donde se observa que tanto las muestras de 1 como las de 2 cm^3 se ajustan a un modelo de la potencia de la forma $Y=mx^b$, dado que los valores promedio de “r” (Cuadro 16) se encuentran por encima de 0.98.

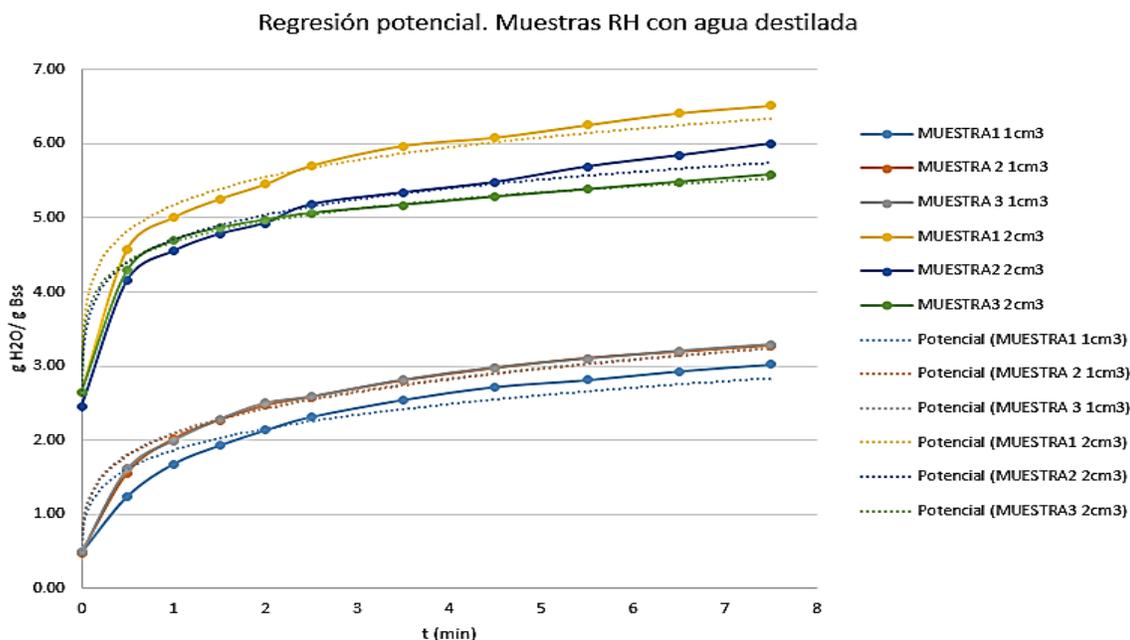


Figura 34. Regresión potencial aplicada al gráfico de las muestras rehidratadas con agua destilada partiendo del modelo de Peleg

La cinética de rehidratación (partiendo del modelo de Peleg) fue aplicada para diseñar un modelo matemático predictivo cuya limitación se basa en las condiciones en las que se trabajó (cortes de carne de pechuga de pavo de 1 y 2 cm^3 , congelación: $T = -49^\circ\text{C}$, $t = 24\text{h}$, liofilización: $T = -49^\circ\text{C}$, $t = 24\text{h}$, $p = 0.035\text{mbar}$, rehidratación: $T = 40^\circ\text{C}$, $t = 7.5\text{min}$, agua destilada). Partiendo del Cuadro 16 y de los valores promedio obtenidos los modelos predictivos serían: $y = 2.0169^{0.2142}$ para muestras de 1 cm^3 y $y = 4.8520^{0.0941}$ para muestras de 2 cm^3 .

Cuadro 16. Valores de la regresión potencial para las muestras rehidratadas con agua destilada

CTES	MUESTRAS 1 cm^3		MUESTRAS 2 cm^3	
	PROMEDIO	% C.V.	PROMEDIO	% C.V.
m	2.0169	6.4	4.8520	5.7
b	0.2142	2.6	0.0941	10.1
r²	0.9824	1.8	0.9901	6.9

3.2 Actividades experimentales de acuerdo al diseño experimental

3.2.1 pH

Cuadro 17. Resultados de pH

Condición	pH	C.V.
PIROF. 0.3% 1 cm ³	6.4	0.18
PIROF. 0.7% 1 cm ³	6.6	0.31
TRIP. 0.3% 1 cm ³	6.4	0.24
TRIP. 0.7% 1 cm ³	6.7	0.33
PIROF. 0.3% 2 cm ³	6.1	0.29
PIROF. 0.7% 2 cm ³	6.3	0.15
TRIP. 0.3% 2 cm ³	6.2	2.62
TRIP. 0.7% 2 cm ³	6.4	0.09

Como se muestran en el Cuadro 17, el pH que presentó mayor valor fue para las muestras de 1cm³, específicamente para los de tripolifosfato en concentraciones de 0.7%. El efecto neto es el desplazamiento del punto isoeléctrico hacia un pH más bajo y el aumento del espacio entre los filamentos a pH 5 o superior. Los polifosfatos actúan de dos formas: elevan el pH del medio, alejándolo del punto isoeléctrico de las proteínas de la carne, lo cual reduce la interacción de las moléculas de proteína entre sí, y coopera a disociar el complejo actina-miosina formado durante el establecimiento del rigor mortis. Ambos efectos tienden a «debilitar» la red de proteínas miofibrilares que retiene el agua de la carne, ampliando el espacio en que esta agua está retenida y evitando la exudación.

A pesar de que bibliográficamente se encontró que los pirofosfatos confieren a los sistemas cárnicos valores de pH más altos en comparación con otras sales, el tripolifosfato es quien produjo un pH mayor en la pechuga de pavo liofilizada - rehidratada.

Berk (2013) y Khalloufi (2005) han determinado que la geometría o las dimensiones son un factor determinante para un producto liofilizado, en este caso se puede relacionar esta influencia al comparar el pH, ya que las muestras de 2 cm³ mostraron un pH menor, lo que está relacionado con una menor difusión de la solución al producto, que se presenta cuando se rehidrata la misma.

Al realizar una comparación de la carne de pavo fresca con la liofilizada-rehidratada se puede observar que hay un incremento de hasta 0.7 unidades, esto debido al implemento de las sales de tripolifosfato y pirofosfato, debido a este incremento, se vieron afectadas las demás

determinaciones, por ejemplo, referente al grado de rehidratación, si el pH se encuentra por encima del punto isoeléctrico, desaparecen algunas cargas positivas que determinan la repulsión de los filamentos dejando más espacio a las moléculas de agua, por lo tanto, aumentara esta propiedad a diferencia de rehidratar únicamente con agua.

La influencia del pH se debe, entre otras causas, a que el aumento de la fuerza iónica favorece la solubilización de las proteínas, en las cuales, cerca del punto isoeléctrico, la solubilidad desciende notablemente. La unión de moléculas de agua a estas proteínas está dominada por interacciones grupo cargado dipolo. Con el color se relaciona de manera que influye en la oxidación- reducción de la mioglobina.

En la Figura 35 se muestran los gráficos de interacción de pH donde se puede apreciar que las concentraciones de pirofosfato tiene menor efecto en el pH a diferencia del tripolifosfato, en donde si afecta la concentración.

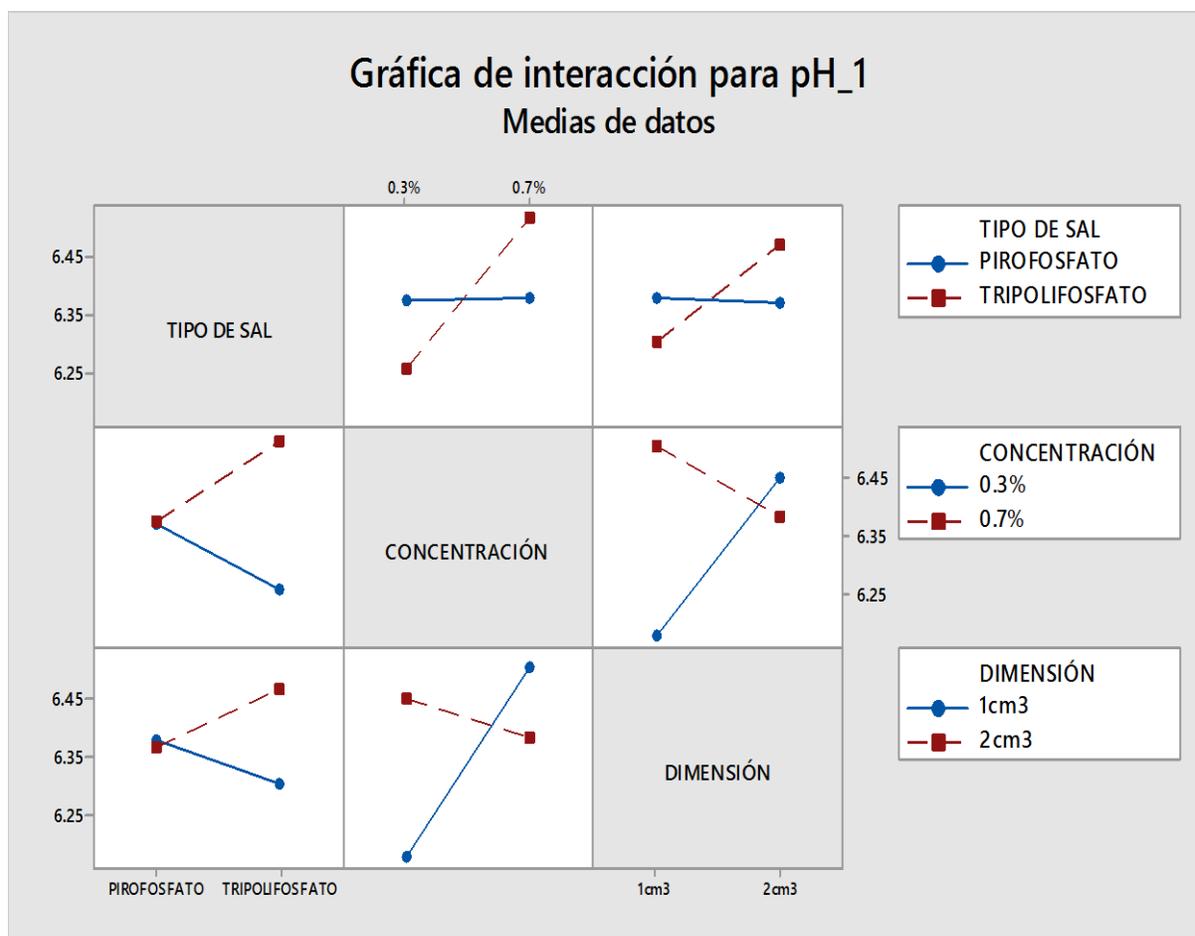


Figura 35. Grafica de interacción pH

De acuerdo a este gráfico, se puede interpretar que el pH está en función de los tres factores (tipo de sal, concentración, geometría), en los que tienen mayor efecto la concentración y tipo de sal, sobre todo cuando se habla de tripolifosfato a una concentración de 0.7%. La dimensión (tamaño 1 y 2 cm³) es un factor que afecta en mayor magnitud para las dos diferentes concentraciones, sobre todo cuando se trata de 1 cm³, mientras que la de 2 cm³ solo influye 0.1 unidades respecto a la concentración de 0.3 y 0.7% al igual que en el tipo de sal, lo que nos indica que las interacciones electrostáticas son mayores en una dimensión de 1 cm³ y que a medida que aumenta la concentración en esta variable, aumentará significativamente el pH, por el contrario, al emplear la dimensión de 2 cm³, la variación de pH al emplear diferentes concentraciones es menor, a lo que podemos atribuir que al aumentar la concentración proteica el sistema se ve menos afectado por la concentración de la sales.

El efecto de las sales (polifosfato de sodio y tripolifosfato de sodio) en el sistema cárnico, es un ejemplo típico de la fuerza iónica y la influencia de la carga eléctrica de las proteínas representado por el aumento de pH.

3.2.2 Capacidad de retención de agua

En el Cuadro 18, se muestran los promedios de la determinación de capacidad de retención de agua, cabe mencionar que está representado en porcentaje de agua pérdida al finalizar la prueba.

Cuadro 18. Resultados del % CRA de pavo rehidratado

Condición	(%) PROMEDIO	C.V.
PIROF. 0.3% 1 cm ³	20.82	5.5
PIROF. 0.7% 1 cm ³	16.05	6.6
TRIP. 0.3% 1 cm ³	15.71	1.3
TRIP. 0.7% 1 cm ³	16.88	2.5
PIROF. 0.3% 2 cm ³	8.46	4.6
PIROF. 0.7% 2 cm ³	7.32	2.3
TRIP. 0.3% 2 cm ³	8.94	7.4
TRIP. 0.7% 2 cm ³	7.49	4.1

La capacidad de retención de agua, está en función de muchas variables, una de ellas es el contenido de agua, por lo que se esperó que a mayor contenido de agua mostrará una menor capacidad de retención, las muestras de 2 cm³ presentan una mayor capacidad de retención debido a que están rehidratadas a un 60% por lo que su estructura está constituida únicamente por agua ligada, que al momento de aplicarle una fuerza (en este caso centrifuga) difícilmente será removida, por lo que el tamaño de la muestra es determinante dentro del proceso y tiene impacto en los parámetros de calidad.

En la capacidad de retención de agua, a pH alejado de 5.5 se muestra una mejora en la CRA, por lo que se puede determinar que la pérdida de atracción eléctrica de los dipolos o de las moléculas de agua y de la falta de espacio entre las proteínas miofibrilares provoca una baja CRA.

Los cambios conformacionales de la molécula de proteína pueden afectar la naturaleza y la disponibilidad de los sitios de hidratación y, por lo tanto, las características termodinámicas de las reacciones de captación de agua.

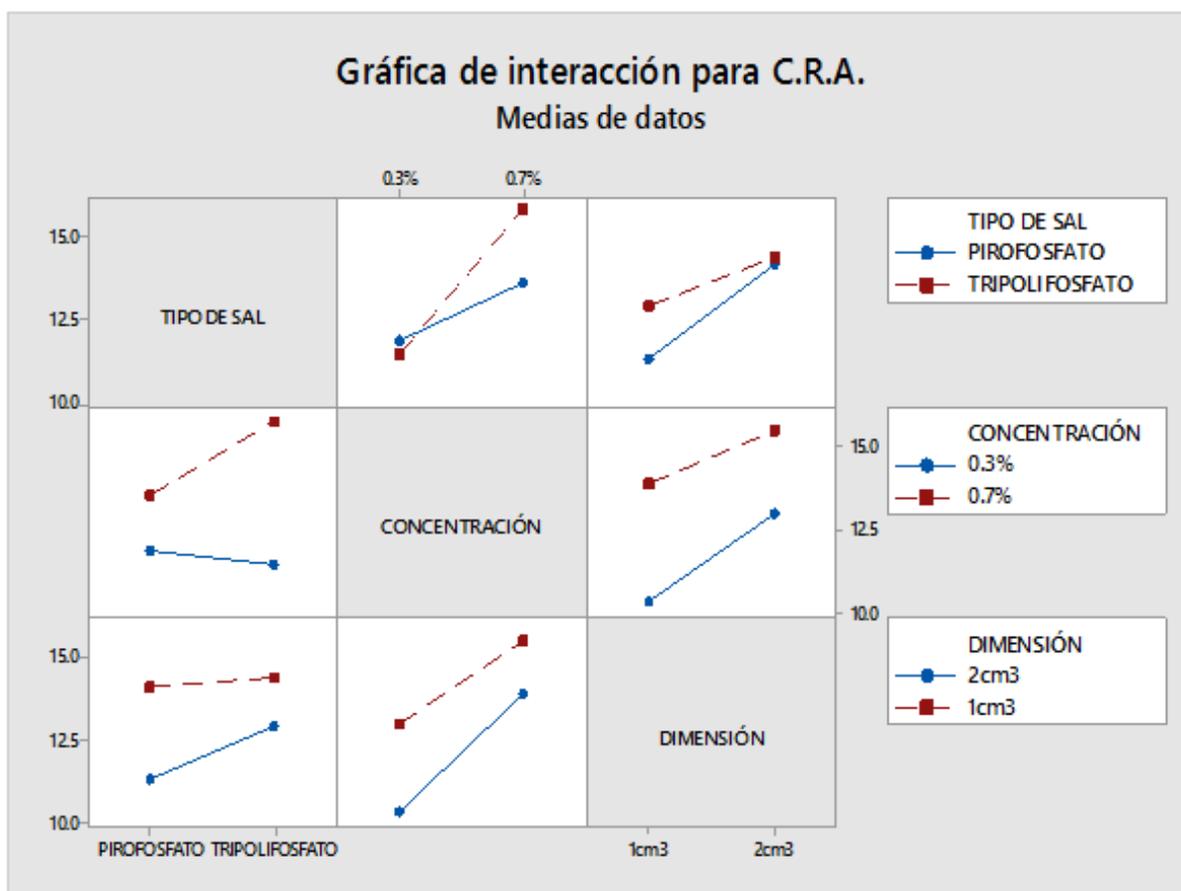


Figura 36. Grafica de interacción capacidad de retención de agua

De acuerdo con la Figura 36, se puede apreciar que la dimensión de 1 cm^3 a concentraciones de 0.7% en presencia de tripolifosfato muestran un mayor efecto, en comparación con la dimensión de 2 cm^3 , la explicación a este fenómeno está relacionado con la difusión de las sales dentro de la estructura proteica, ya que como se ha mencionado en los antecedentes, las sales producen que las interacciones internas sean menores, permitiendo una mayor interacción con el medio externo (solución con pirofosfato y tripolifosfato).

De acuerdo a los datos de este parámetro obtenidos durante la experimentación y como consecuencia de la asociación de iones a las moléculas de proteínas (debido al incremento del pH que se refleja en el desplazamiento del punto isoeléctrico de las proteínas), las muestras de tripolifosfato mostraron una mejoría en la capacidad de retención de agua a diferencia del pirofosfato de sodio. Al comparar las concentraciones independientemente de las sales, se observa que esta propiedad fisicoquímica, mejora al aumentar la concentración de 0.3 a 0.7%.

El pirofosfato tiene menor efecto tanto en la concentración como en el tamaño del producto (dimensión), a diferencia del tripolifosfato que muestra una diferencia significativa de casi 5 unidades cuando se trata de la concentración de 0.3% frente a la de 0.7%, mientras que muestra una diferencia de solo 2 unidades referente a la dimensión de 1 cm^3 y 2 cm^3 .

Esta característica está en función del espaciamiento y la integridad del entramado de fibras gruesas y delgadas y posiblemente también a la extensión de la interacción miosina-actina y a la alta proporción de aminoácidos cargados en las proteínas miofibrilares. Más del 90% de la CRA. Es debida a las proteínas miofibrilares.

Para estas condiciones, se vió afectada por la capacidad de rehidratación. Ratti (2001), plantea que la liofilización no daña al alimento, pero de acuerdo con los resultados experimentales, se muestra que en las proteínas no se logra incorporar la cantidad inicial de agua a pesar de emplear sales de polifosfato de sodio y que al comparar los valores de capacidad retención de agua en las muestras rehidratadas con agua destilada existe una diferencia significativa que es consecuencia, como se ha mencionado anteriormente, del grado de rehidratación. Las muestras rehidratadas con sales presentan valores superiores de este parámetro, debido a la fuerza iónica de estas sales, la incorporación de agua en el sistema cárnico ya no es únicamente agua ligada, si no también agua libre la cual se refleja en el incremento de C.R.A.

3.2.3 Resistencia a la deformación

En el Cuadro 19, se puede apreciar que la dureza se ve afectada principalmente por la dimensión (1 cm³ y 2 cm³), a diferencia de la concentración y tipo de sal, esto es debido a que una de las variables que se relacionan con la dureza, es la capacidad de rehidratación, a medida que un alimento tenga más agua en su sistema menor dureza tendrá y al estar rehidratado a un 60% las muestras de 2 cm³ mostraron valores por encima de este parámetro por encima de 1 cm³ (Figura 37).

Cuadro 19. Resultados Dureza

	DUREZA (kg _f /cm ²)	D.E.	C.V.
PIROF. 0.3% 1 cm ³	3.4	0.072	2.28
PIROF. 0.7% 1 cm ³	3.0	0.105	3.83
TRIP. 0.3% 1 cm ³	3.2	0.127	3.74
TRIP. 0.7% 1 cm ³	2.9	0.220	7.45
PIROF. 0.3% 2 cm ³	5.1	0.048	1.02
PIROF. 0.7% 2 cm ³	4.8	0.253	5.03
TRIP. 0.3% 2 cm ³	4.4	0.064	1.44
TRIP. 0.7% 2 cm ³	4.0	0.083	2.11

De acuerdo a lo explicado anteriormente se puede identificar en el Cuadro 19 que el tratamiento que mostró mayor dureza es el de pirofosfato a una concentración de 0.3% y 2 cm³ ya que esta es la muestra que presenta el pH más bajo, lo que por el contrario la muestra que presenta el pH más elevado es la de tripolifosfato 0.7% 1 cm³ y que refleja su correlación al presentar una dureza de 2.9 kg_f/cm² (la más baja).

Otra de las variables que afectan directamente la textura de la carne y los productos cárnicos es el pH, ya que este parámetro influye directamente sobre la capacidad de retención de agua, siendo este último mayor en la dimensión mencionada anteriormente (2 cm³).

Se ha demostrado experimentalmente que la dureza está relacionada con la CRA y los cambios ocurridos durante la liofilización y sobre todo en la rehidratación que influyen directamente sobre la interacción de agua-proteína. Durante la rehidratación empleando sales de sodio, los cambios catiónicos totales se sitúan dentro de las proteínas de la carne, resultando una mayor hidratación y una mejora de la dureza y jugosidad (Arnold *et al.*, 1956).

Dentro de las muestras de 1 cm³ la que tuvo mayor dureza fue la de polifosfato a una concentración de 3%, por lo que de acuerdo a los resultados obtenidos podemos incluir que este tipo de sal, bajo las mismas concentraciones que el tripolifosfato de sodio, provoca menos interacciones dentro de la estructura proteica, específicamente tratándose en las zonas hidrofóbicas, ya que se ve reflejado en el pH (el cual es menor) y repercute en la CRA. La cual es una de las principales variables influyentes de la dureza de un producto cárnico.

Cabe mencionar que las muestras liofilizadas rehidratadas mostraron valores por debajo de más de 1 unidad (Kg_f/cm²) respecto a las muestras frescas, por lo que no se vertió a su estado estructural original previo al procesamiento.

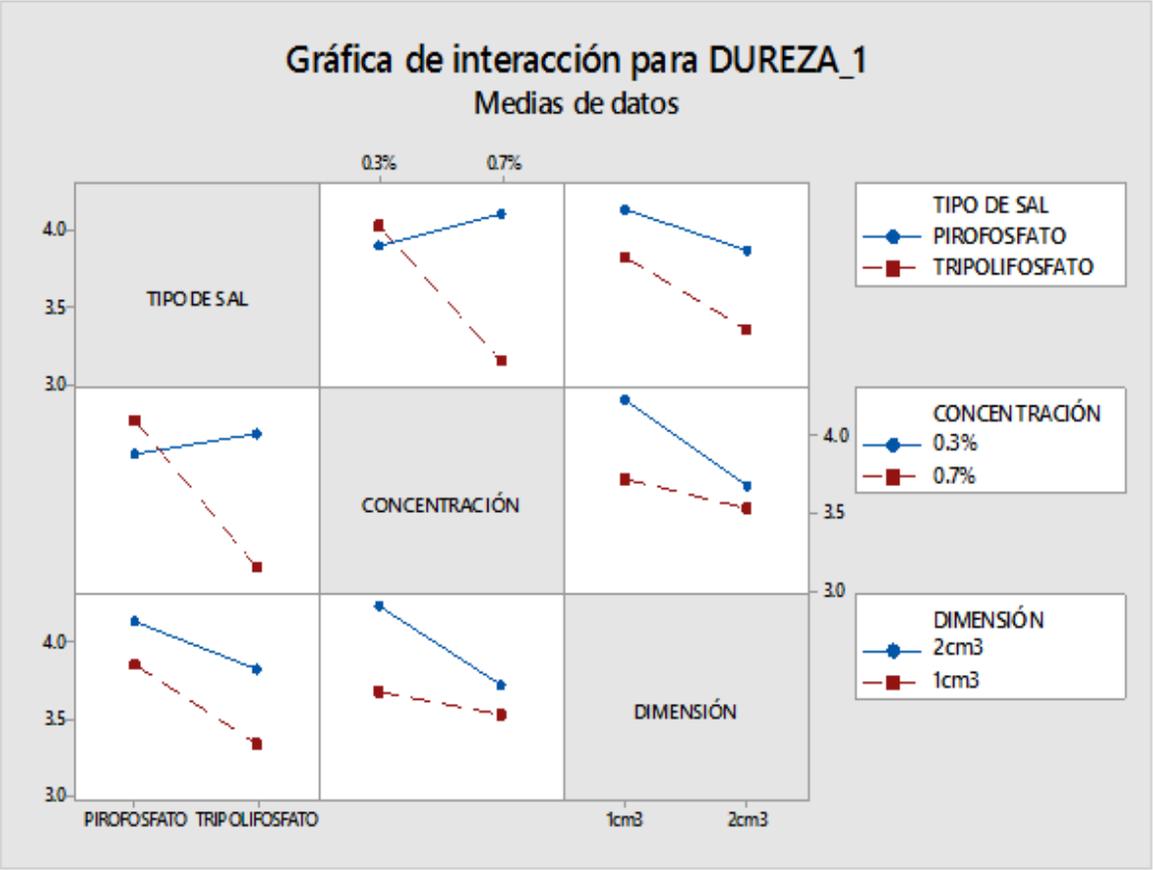


Figura 37. Interacción Dureza

De acuerdo a la gráfica de interacciones (Figura 37), el principal factor que tiene efecto sobre la dureza es el tipo de sal a concentraciones de 0.7%. La geometría de 1 cm³ muestra un valor menor de dureza sin importar la concentración o el tipo de sal, esto debido a que estas muestras son las que han mostrado mayor CRA. El tripolifosfato muestra una mayor interacción de hasta 1 unidad

(Kg_f/cm²) al emplear las concentraciones de 0.3% y 0.7%. La concentración de 0.3% al emplear los diferentes tipos de sales (pirofosfatos y tripolifosfatos) muestra interacción con respecto a la concentración de 0.7% en respuesta a este parámetro de calidad.

La dimensión (1 y 2 cm³) tienen un efecto significativo bajo tanto en las diferentes concentraciones como para el tipo de sal. Por lo que la dureza está influenciada en mayor proporción por el tipo de sal en concentraciones altas para la dimensión de 1 cm³. La concentración a 0.3% no se ve afectada por el tipo de sal, por el contrario, hay existe diferencia referente a la concentración de 0.7% en el tipo de sal, ya que la variación entre la primera y la segunda es hasta de 1 unidad (Kg_f/cm²) mostrando mayor dureza el pirofosfato de sodio.

3.2.4 Actividad de agua

Dentro de este parámetro, la congelación y la liofilización tiene un impacto sobre el daño estructural de la muestra, primero, por la formación de cristales, el tamaño y la geometría, que pueden causar daños irreversibles a la estructura, y segundo, se obtienen un producto con una actividad de agua por debajo de 0.2, lo que implica que se extrae el agua ligada y al igual produce daños. Por otra parte el proceso de deshidratación no sigue el mismo camino que el de rehidratación. Estadísticamente los datos fueron tratados por replica (3) y repetición (3) en donde se obtuvo un bajo coeficiente de variación (Cuadro 20).

Cuadro 20. Resultados de a_w de pechuga de pavo rehidratada

Condición	a_w	C.V.
PIROF. 0.3% 1 cm ³	0.90	3.48
PIROF. 0.7% 1 cm ³	0.92	4.04
TRIP. 0.3% 1 cm ³	0.92	6.00
TRIP. 0.7% 1 cm ³	0.94	4.04
PIROF. 0.3% 2 cm ³	0.84	5.19
PIROF. 0.7% 2 cm ³	0.86	2.84
TRIP. 0.3% 2 cm ³	0.85	5.17
TRIP. 0.7% 2 cm ³	0.87	6.87

En el Cuadro 20, se puede observar que los tratamientos que mostraron la mayor actividad de agua fueron los de pirofosfato y tripolifosfato a la concentración de 0.7% con la dimensión de 1 cm³.

Las determinaciones realizadas al producto liofilizado rehidratado se asemeja al de la pechuga de pavo sin procesar, por lo que respecto a este parámetro se puede considerar que se conservó esta propiedad aun después del proceso de liofilización rehidratación y únicamente para las muestras de 1 cm³.

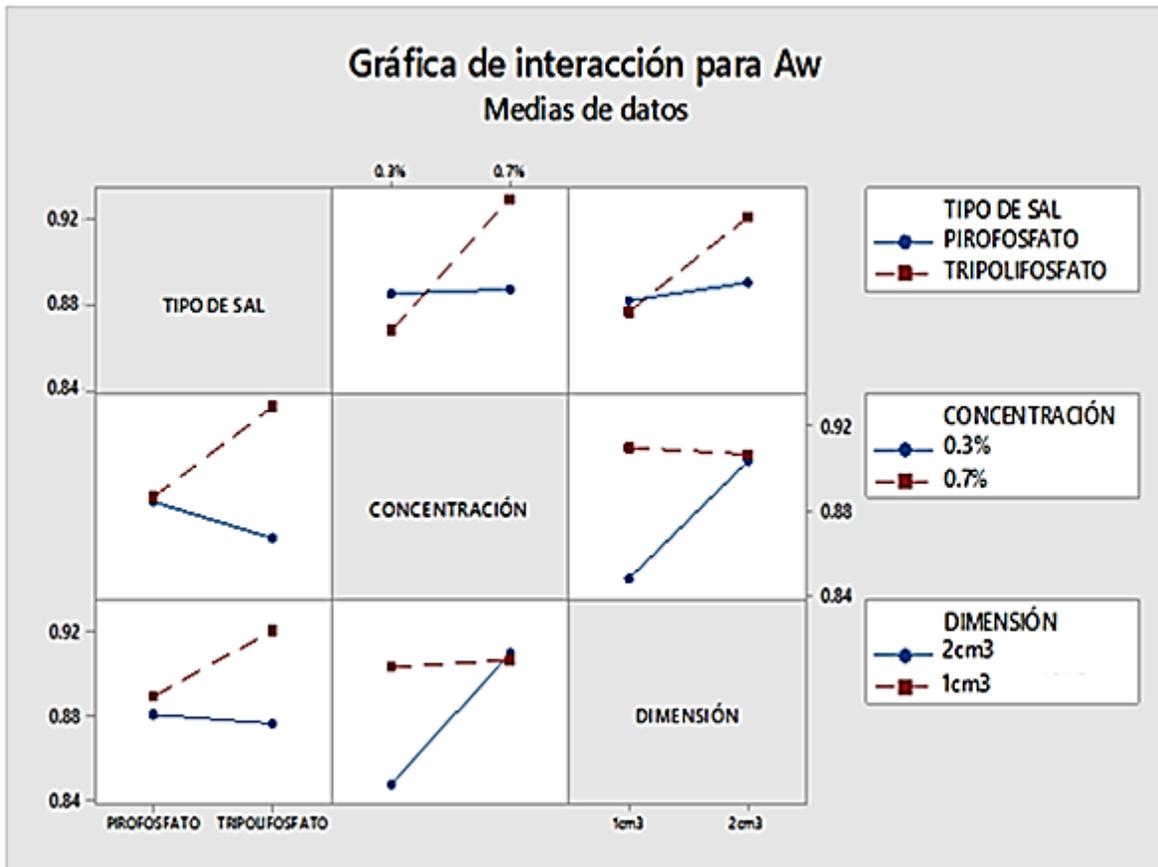


Figura 38. Interacción a_w

En la Figura 38, se puede observar que la concentración de 0.7% tanto en la dimensión de 1 cm³ como en la de 2 cm³ da como respuesta mayor valor en actividad de agua, esto se da en principio porque al emplear concentraciones más altas, mayor afectación tendrá en el pH, este parámetro de calidad tiene repercusiones en las diferentes variables de respuesta, ya sea de manera directa o indirecta, para este caso, la afectación principal sería en la capacidad de rehidratación del producto liofilizado-rehidratado debido a las interacciones producidas en las proteínas actina-miosina respecto a la molécula de agua. Cabe mencionar que la baja actividad de agua que se observa para la geometría de 2 cm³ es consecuencia del bajo porcentaje de rehidratación. Comparando el tipo

de sal con la a_w se puede encontrar que las sales de tripolifosfato proporcionan un valor mayor en comparación del polifosfato de sodio independientemente de la dimensión o de la concentración. Es importante mencionar que al igual que los parámetros de calidad anteriores, los productos liofilizados-rehidratados tuvieron una menor a_w de la carne fresca.

3.2.5 Color

Para la determinación de color, el parámetro de L^* esta relacionado con el estado físico de la muestra, que es consecuencia de las interacciones químicas producidas por la adición de sales, quienes repercuten directamente en el grado de rehidratación. El efecto de la adición de sales en la solubilidad de las proteínas indica que son un electrolito fuerte, que se disocia fácilmente en agua donde es altamente soluble, y que puede cambiar apreciablemente el pH de sus soluciones. El pH de la muestra tiene un efecto importante sobre la mediación de los estímulos L^* , a^* y b^* , afectando principalmente al parámetro de L^* y a^* de acuerdo a Brewer, Novakofski y Freise (2006). En el Cuadro 20 se muestran los resultados obtenidos para cada estímulo de color.

Lo que se puede explicar de acuerdo a los resultado obtenidos de los tres estímulos de color (de acuerdo a sistema CIELAB) mostrados en el Cuadro 21, es que el estímulo L^* está relacionado con el grado de rehidratación, a medida que este aumente, como en el caso de las muestras de la muestra de 1 cm^3 , los valores del estímulo disminuirán, dando como resultado muestras menos traslucida.

Cuadro 21. Resultados de los parámetros del perfil de color (L^* , a^* , b^*)

Condición	PROMEDIO		
	L^*	a^*	b^*
PIROF. 0.3% 1 cm^3	48.4	4.5	11.7
PIROF. 0.7% 1 cm^3	48.3	3.5	10.4
TRIP. 0.3% 1 cm^3	48.5	3.8	11.9
TRIP. 0.7% 1 cm^3	48.5	3.5	11.9
PIROF. 0.3% 2 cm^3	52.7	8.2	17.0
PIROF. 0.7% 2 cm^3	53.0	8.9	16.9
TRIP. 0.3% 2 cm^3	54.0	6.8	16.9
TRIP. 0.7% 2 cm^3	53.0	7.5	16.9

Lo que se puede explicar de acuerdo a los resultado obtenidos de los tres estímulos de color (de acuerdo a sistema CIE Lab) mostrados en el Cuadro 20, es que el estímulo L^* está relacionado con el grado de rehidratación, a medida que este aumente, como en el caso de las muestras de la muestra de 1 cm^3 , los valores del estímulo disminuirán, dando como resultado muestras menos translucida.

Al comparar los resultados de las muestras rehidratadas con agua destilada y los resultados correspondientes a la rehidratación con sales de sodio, se puede determinar que en estos últimos, hay una mayor aproximación de los valores obtenidos a partir de la pechuga de pavo fresca, lo que nos indica que al hidratar con estas sales se obtienen estímulos L^* , a^* y b^* más cercanos al de la muestra fresca.

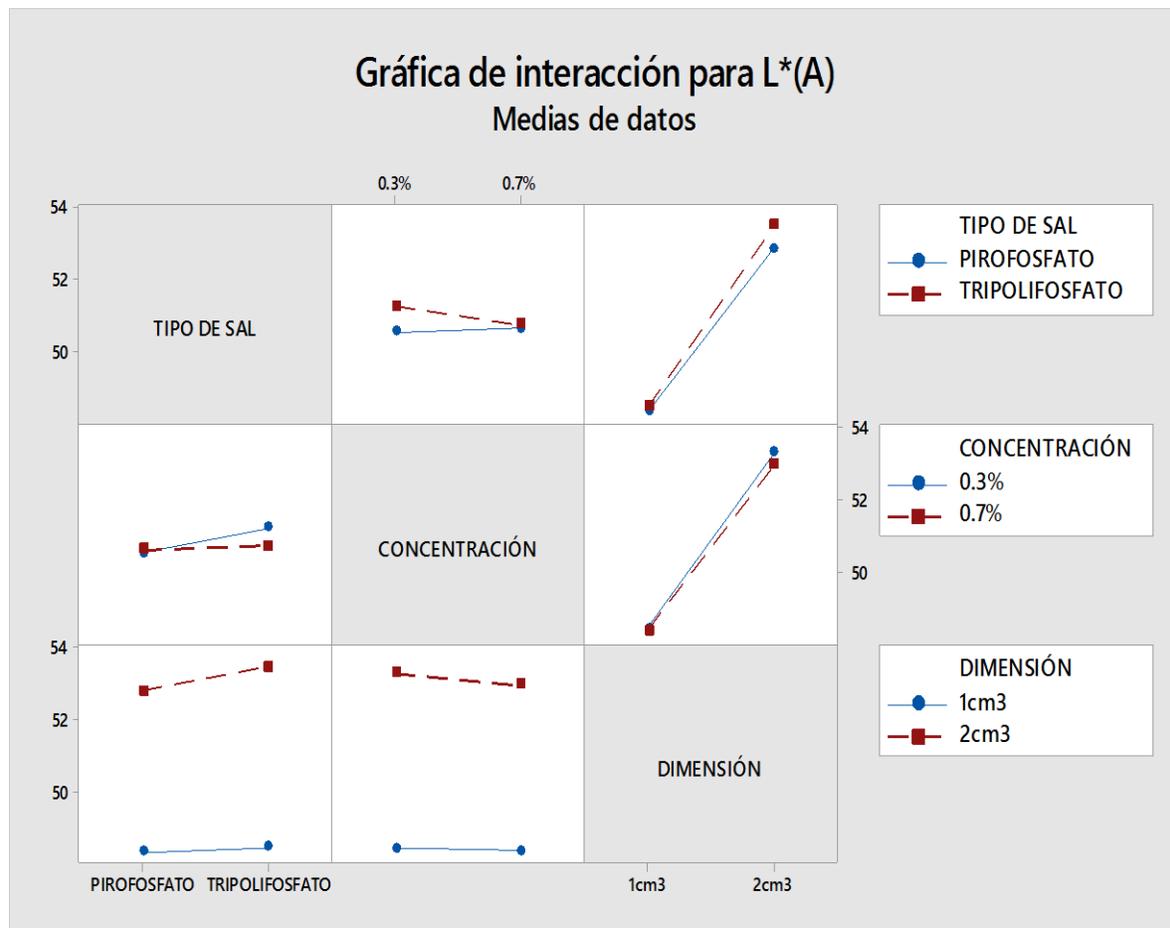


Figura 39. Interacción color (L^*).

Lo que se puede apreciar en la Figura 39, al analizar la dimensión (1 cm^3 y 2 cm^3), es que no hay afectación de esta variable referente a la concentración y el tipo de sal. Respecto a la concentración podemos determinar que el tipo de sal no produce una diferencia significativa del estímulo L^* , por el contrario, los valores mostrados para la dimensión de 2 cm^3 son mayores que los de 1 cm^3 . De acuerdo a este gráfico de interacción, podemos analizar que este parámetro se ve más afectado por las dimensiones de la muestra que por las dos variables restantes, pues como se menciona línea atrás, este estímulo nos indica el grado de luminosidad, el cual para una muestra de carne fresca de pechuga de pavo fue de 41.5, esto demuestra lo contrario a lo establecido por Andoritz y Le Quére (2004), quienes representan a la liofilización como un proceso que no altera en gran medida las características sensoriales de los alimentos, mientras que de acuerdo con Barbosa, Vega y Mercado (2000), un alimento deshidratado tendrá repercusiones sensoriales importantes y a pesar de tener un proceso de reversibilidad, este no podrá adquirir las mismas características del alimento antes de este proceso.

En un sistema reflectante, absorbancia y reflectancia están inversamente relacionados, porque la luz de una determinada longitud de onda es o bien absorbida o reflejada. En un semi-transparente o un sistema transparente como la carne, la luz efectivamente se perderá por la refracción interna de manera que la absorbancia y la reflectancia no son exactamente recíprocas (CIE Lab, 1978).

La translucidez de la carne está fuertemente afectada por el pH, en este sentido, las proteínas musculares tienen dos características importantes; los aminoácidos interiores con cadena lateral hidrofóbica y una superficie de aminoácidos hidrófilos principalmente que interactúan con agua intracelular o extracelular (Berg, Tymoczko y Stryer, 2002). La carga de cada aminoácido de la superficie, y por lo tanto el grado de interacción con el entorno acuoso circundante, se determina por el pH. Cuanto mayor sea la superficie, ya sea positivo o negativo, mayor es la interacción con el entorno acuoso y mayor es el volumen de agua y solutos unidos alrededor de la proteína.

La carga neta de una proteína es más baja en el punto isoeléctrico y por lo tanto la interacción con agua y solutos atados alrededor de la proteína es más baja y el volumen de soluto unido a la proteína es más bajo. Esta baja interacción en el punto isoeléctrico se refleja en baja capacidad de unión de agua y un mínimo de solubilidad de la proteína.

De acuerdo a Bendall y Swantland (1988), el volumen reducido de agua ligada y los solutos a pH cerca del punto isoeléctrico también disminuye la transparencia, reducir la pérdida de luz de

refracción interna y el aumento de luz incidente de la reflexión, resultando en una apariencia más ligera, en donde al comparar los valores de la muestra fresca con la de la liofilizada-rehidratada, la diferencia es de al menos 7 unidades respecto a la muestra más próxima que corresponde a la de 1 cm³, donde podemos deducir que las muestras, al no tener los mismos valores de humedad referente a la pechuga de pavo fresca, tendrá valores del estímulo L* por encima de 41.5.

Dentro de este parámetro, las modificaciones importantes de color se deben a la mioglobina y la cantidad relativa de oxígeno. Uno de los principales factores que influye en el cambio de color es la desnaturalización de la mioglobina. Además, el pH de la carne afecta a la capacidad para generar mioglobina reducida tal y como lo expresa Zhu, Bidner y Brewer (2001).

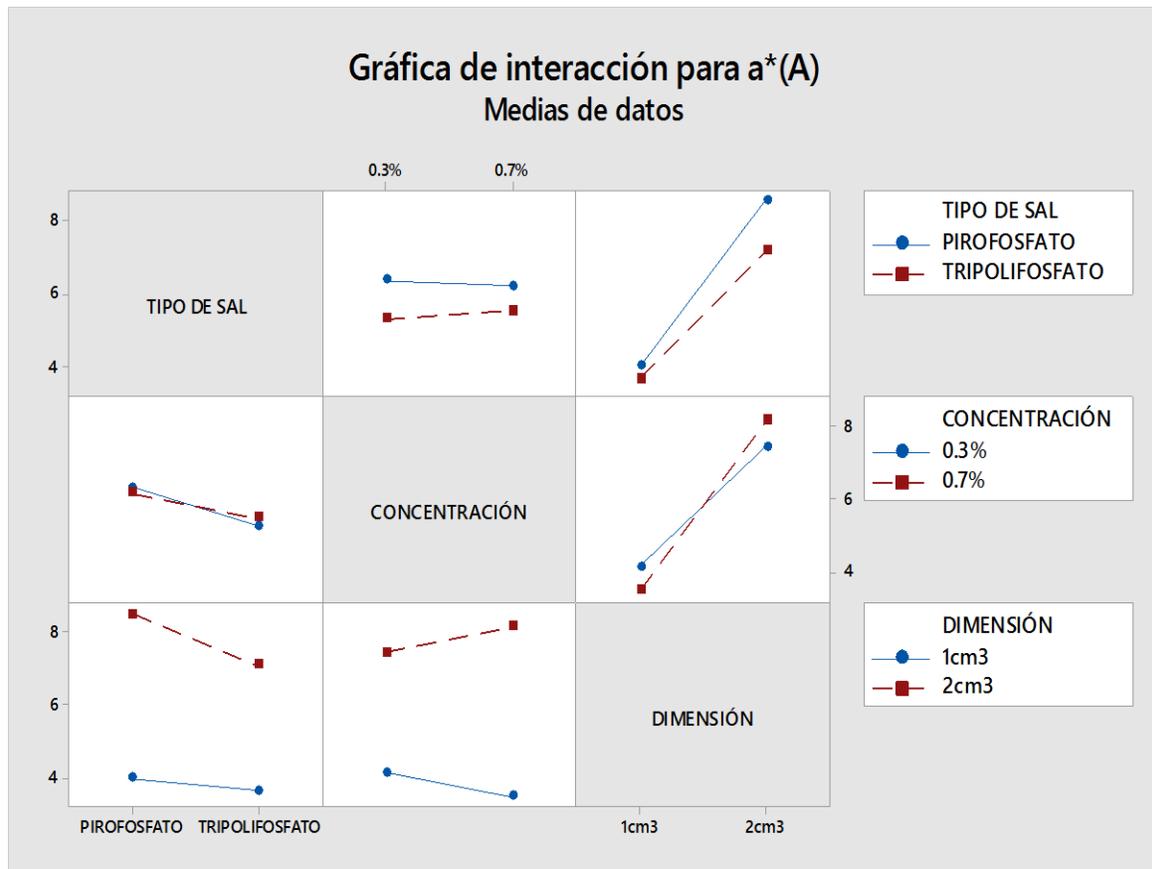


Figura 40. Interacción color (a*)

En la Figura 40, se puede observar que existe interacción entre las variables de dimensión y concentración, al igual, solo que en menor proporción, existe interacción entre la variable de concentración y el tipo de sal. De acuerdo a este gráfico podemos inferir que las muestras de 2 cm³

presentan valores mayores del estímulo de color a^* respecto al del valor bajo de la misma variable hasta por 4 unidades, esto indica que las muestras mayormente rehidratadas representan valores aproximados de a^* de la medición realizada a la de la muestra fresca (en donde ambos muestran valores promedio de 3 unidades).

Como ya se ha mencionado anteriormente, este parámetro tiene relación con el color rojo de la carne, y este mismo está asociado con la oxigenación de la mioglobina y los cambios estructurales, químicos que ocurren con esta proteína.

La dimensión es un factor determinante al realizar este tipo de mediciones cuando se trata la carne bajo el proceso en estudio realizado, pues como se aprecia en la Figura 40, la dimensión baja, determina valores más bajos y por tanto más próximos al de la carne fresca, esto se relaciona, con el grado de absorción y reflexión del haz de luz emitido por el colorímetro, muestras más grandes representan una mayor absorción propiciado una menor reflexión dando como respuesta valores superiores para los tres estímulos en diferencia con muestras de menor tamaño.

Las condiciones durante el proceso de liofilización-rehidratación afectan directamente el grado de oxigenación de la mioglobina, temperaturas mayores a los 35°C pueden comenzar a desnaturalizar esta proteína, al rehidratar a una temperatura de 40°C tanto el pirofosfato de sodio como el tripolifosfato de sodio ayudaron a estabilizar dicha macromolécula, siendo entonces el pH el mayor factor determinante que afecte las propiedades de la mioglobina.

Al relacionar el potencial de hidrógeno con el estímulo a^* se puede determinar que a medida que el primer parámetro aumenta, la difusión de oxígeno mejora dentro de la mioglobina (Ledward 1992), pues el pH afecta la capacidad de regenerar la mioglobina reducida (Zhu y Brewer 1999).

Durante el procesamiento liofilización-rehidratación de la pechuga de pavo, la oxigenación de la mioglobina en el desplazamiento de la absorbancia máxima espectro 560-542 y 579 nm corresponde al cambio de color del rojo cereza (estado fresco) a un rojo menos intenso (producido por la oxidación o reducción de la mioglobina a causa de una deshidratación o rehidratación al emplear sales de sodio durante este proceso).

Debido a una mayor fuerza relativa de interacciones hidrofóbicas entre los residuos internos cerca el pH isoeléctrico, la desnaturalización se produce a temperaturas más bajas que a pH lejos del punto isoeléctrico. En pH inferiores, también existe una mayor difusión de oxígeno y los cambios de

la curva de disociación de oxígeno en la mioglobina, producirán mayores cambios en este parámetro. En conjunto, estos cambios representan el aumento visual de la intensidad del color de rosa a pH bajo como lo ha representado Brewer (2001).

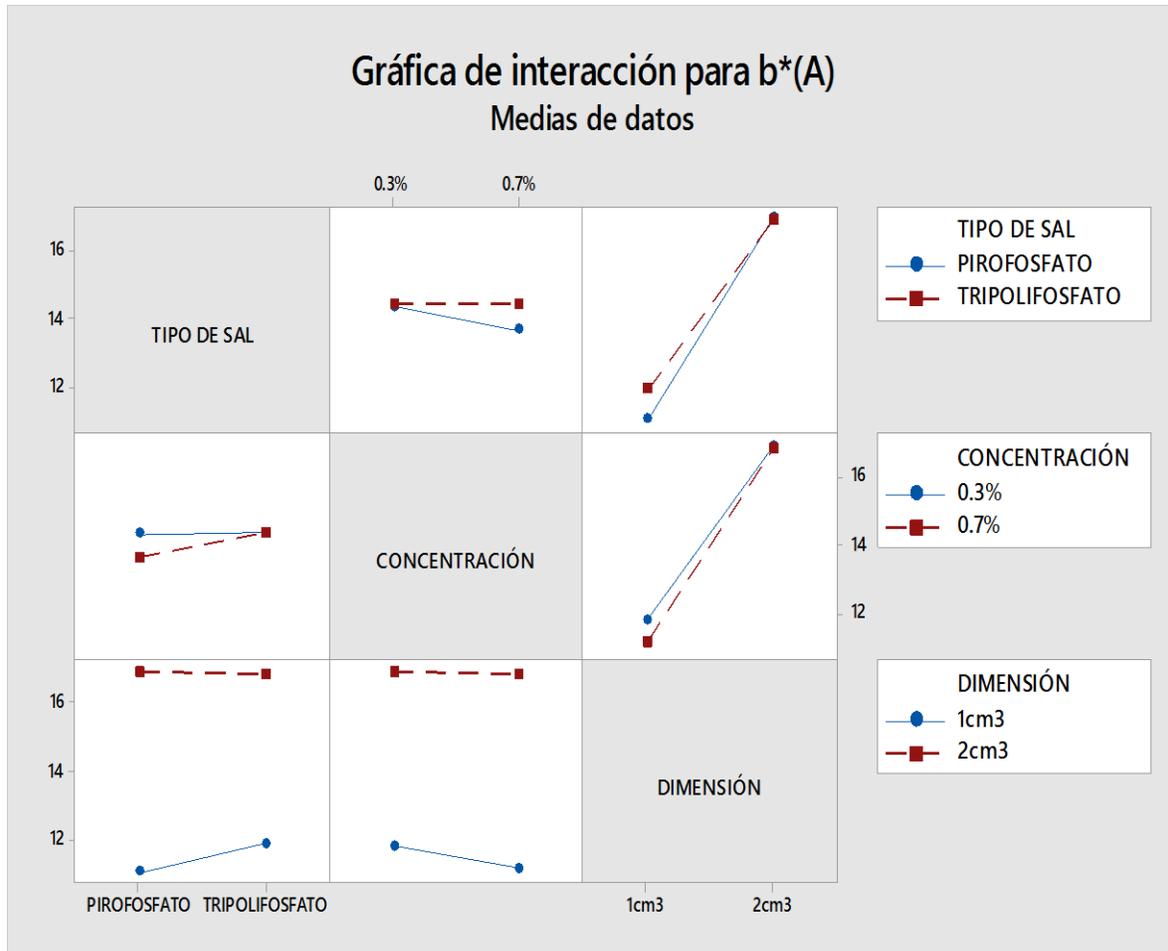


Figura 41. Interacción color (b^*)

En la Figura 41 podemos interpretar que existe interacción entre el tipo de sal y la concentración, por el contrario, la variable de dimensión no se ve afectada por el tipo de sal ni por su concentración al contrastarlos resultados obtenidos del estímulo de color b^* que se refiere a los tonos amarillo (+) y azul (-). Las muestras de 2 cm³ presentaron valores superiores de este estímulo respecto a las muestras de 1 cm³, al comparar de manera aislada el valor bajo de esta variable, se puede observar que la sal de tripolifosfato proporciona valores relativamente superiores referente a los de pirofosfato, por lo que nuevamente relacionamos este evento con el pH, al aumentar este parámetro, los valores de b^* aumentarían significativamente. Cabe mencionar que los valores obtenidos como resultado de la experimentación que son más próximos a los valores presentados

en la muestra de pechuga de pavo fresca son las de 1 cm^3 , ya que la diferencia entre ambas muestras es de casi 6 unidades, podemos inferir que el proceso de liofilización si tiene afectaciones respecto a este parámetro de calidad.

3.2.6 Modelo de Peleg

Los datos se ajustaron al modelo linealizado de Peleg (1988) por regresión lineal simple para cada combinación de concentración, tipo de sal y dimensión.

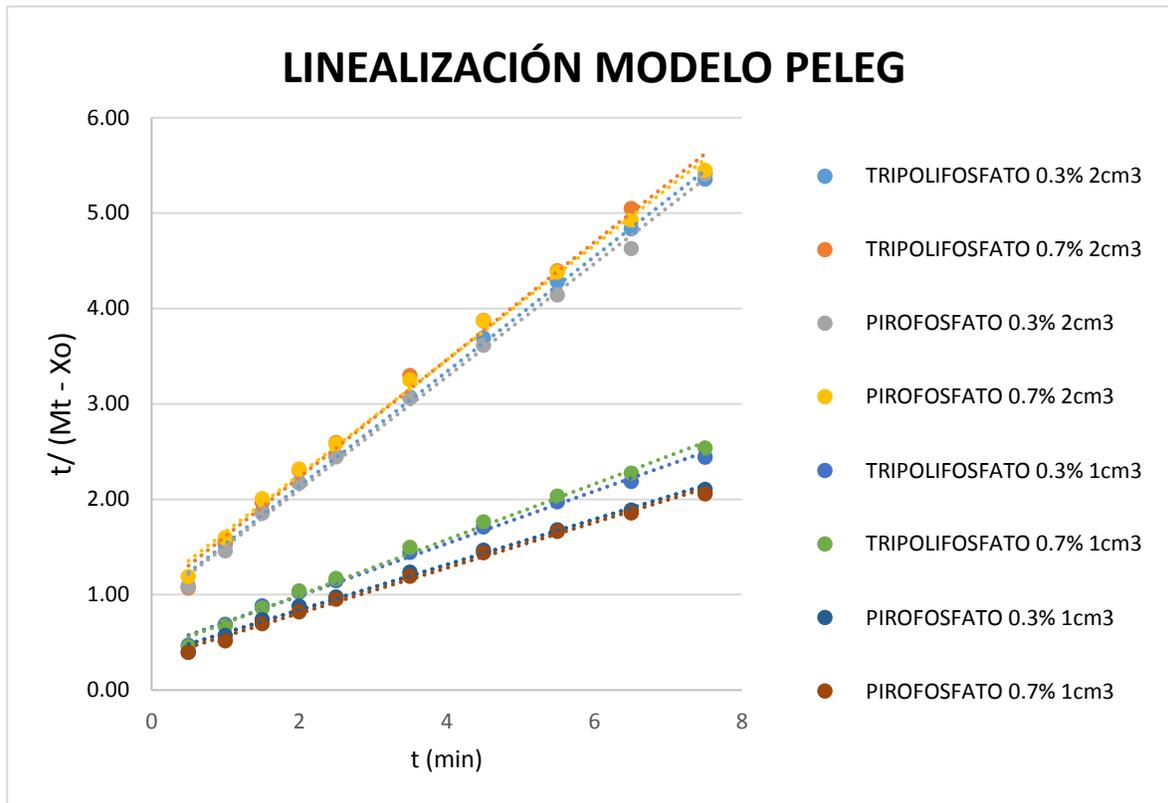


Figura 42. Linealización de acuerdo al modelo de Peleg

En la Figura 42 se puede apreciar la linealización para las 8 diferentes condiciones con las que se trabajó durante la experimentación, donde el eje de la ordenada al origen está representado por el tiempo que se sometieron las muestras a rehidratación dado en minutos y el de la abscisa, que muestra la ganancia de masa a un determinado tiempo, donde “t” es el tiempo en el que se realiza la medición, “ M_t ”, el peso de la muestra a un tiempo de rehidratación mayor de 0, “ X_o ” es el peso inicial de la muestra. Este proceso fue fundamental ya que a partir de la linealización, se obtuvieron

los valores de las constantes k_1 y k_2 del modelo de Peleg para obtener un modelo representativo de rehidratación que pueda describir los cambios de humedad bajo condiciones específicas (Sopade y Kaimur 1999). Al analizar el gráfico podemos observar que este modelo matemático se ajusta a las 8 diferentes condiciones experimentales con las que se trabajó y se puede observar que el comportamiento es similar donde las muestras de 2 cm^3 muestran valores mayores de $t / (M_t - X_0)$ respecto a las de 1 cm^3 en respuesta a que la transferencia de materia se ve afectada por las características del material sometido a rehidratación (tipo de geometría, porosidad, dimensiones, composición química).

3.2.6.1 Constantes de Peleg k_1 y k_2

La linealización de la ecuación de Peleg fue aplicada para cada uno de los tratamientos de los cuales obtuvimos una ecuación y constantes k_1 y k_2 para cada tratamiento obteniéndose valores de correlación mayores que 0.9 tal y como se muestra en el Cuadro 22 y en la Figura 42 resultado gráfico de la aplicación de la ecuación linealizada.

Cuadro 22. Constantes de la linealización del modelo de Peleg

CONDICIÓN	CONSTANTES PELEG		
	k_1	k_2	r^2
PIROF. 0.3% 1 cm^3	0.3625	0.2379	0.9947
PIROF. 0.7% 1 cm^3	0.3273	0.2382	0.9956
TRIP. 0.3% 1 cm^3	0.4387	0.2743	0.9941
TRIP. 0.7% 1 cm^3	0.4112	0.2915	0.9944
PIROF. 0.3% 2 cm^3	0.913	0.5928	0.9969
PIROF. 0.7% 2 cm^3	0.9279	0.6026	0.9981
TRIP. 0.3% 2 cm^3	0.9953	0.6168	0.9928
TRIP. 0.7% 2 cm^3	1.0534	0.6015	0.9962

Por lo que de acuerdo a estos resultados podemos incluir que la velocidad de rehidratación que determina el tiempo para llevar a cabo la operación, depende de la velocidad de transferencia de masa. Las relaciones de equilibrio que limitan la operación son la distribución y difusividad del agua dentro del sistema. Durante la rehidratación de las muestras de pechuga de pavo liofilizada-rehidratada se tiene varios flujos de materia: un flujo de agua que se va a ir difundiendo en la

muestra seca, un flujo de sólidos propios del alimento y que son consecuencia de las condiciones de este proceso ya que se rompen células de la pechuga de pavo (principalmente desnaturalización proteica) y esto hace que algunos compuestos que estaban en la misma se disuelvan en el agua de rehidratación, los cuales afectan el coeficiente de difusión.

Dichos resultados demuestran que al aumentar las dimensiones de las muestras o la concentración de las sales mejorando la difusividad del agua y disminuyen las constantes cinéticas del modelo de Peleg indicando modificaciones estructurales en la capacidad de absorción y en los diferentes parámetros de calidad estudiados en el presente trabajo.

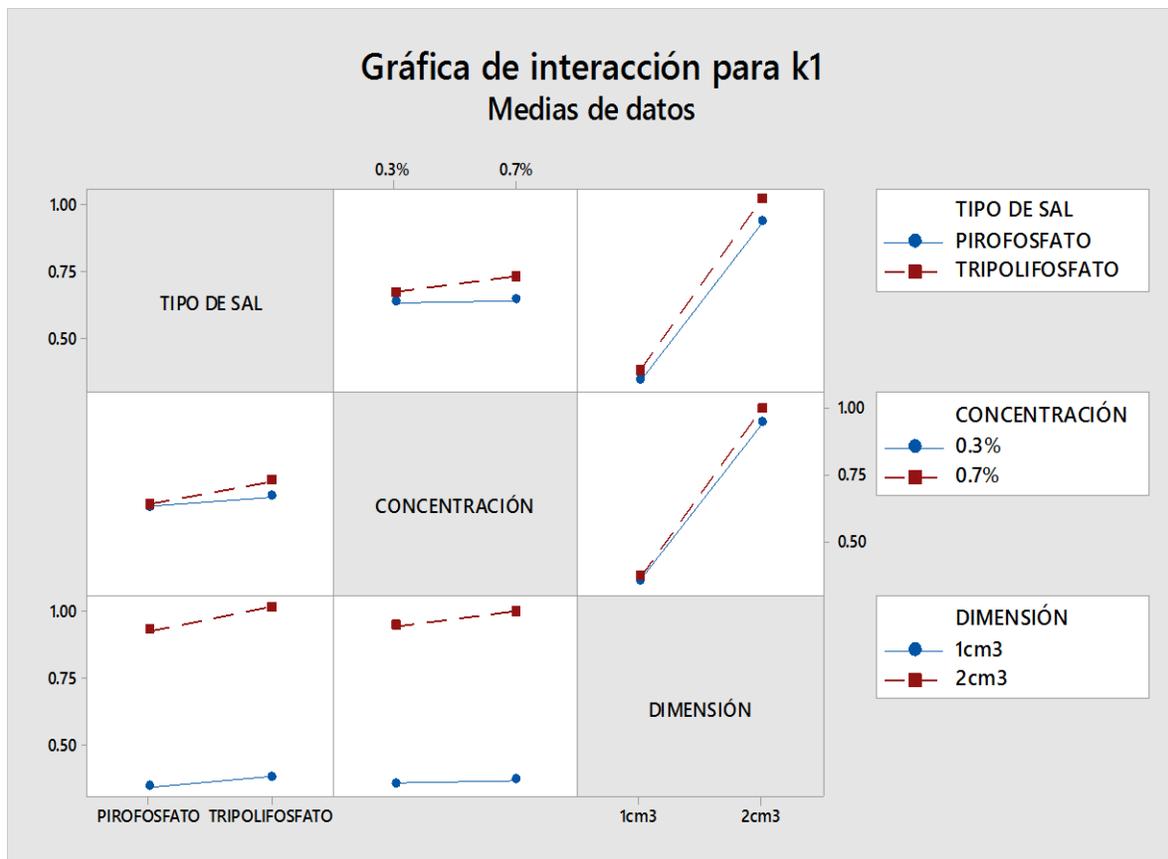


Figura 43. Interacción para la constante 2 según el modelo de Peleg.

De acuerdo a la Figura 43, se observa que empleando sales de tripolifosfato y cuanto mayor es la concentración y el tamaño de la muestra, el valor de este parámetro va aumentando, lo que

representa un aumento en la capacidad de rehidratación. La constante k_1 de Peleg es un parámetro cinético que va a depender directamente con las condiciones de rehidratación, por lo tanto y para este caso, depende de la concentración, tipo de sal y dimensiones (de la muestra).

Las principales variables que interaccionan en este parámetro es la concentración y la dimensión, por otra parte, la dimensión no tiene interacción entre la concentración y el tipo de sal. Los valores más altos de esta constante están dados al emplear dimensiones de 2 cm^3 en comparación con las de 1 cm^3 .

El tipo de sal no representa influencia significativa en respuesta a esta constante k_1 . Al comparar únicamente la sal de pirofosfato, podemos determinar que las concentraciones de 0.7% tanto en las muestras de 2 cm^3 como en las de 1 cm^3 muestran valores superiores a la de 0.3%.

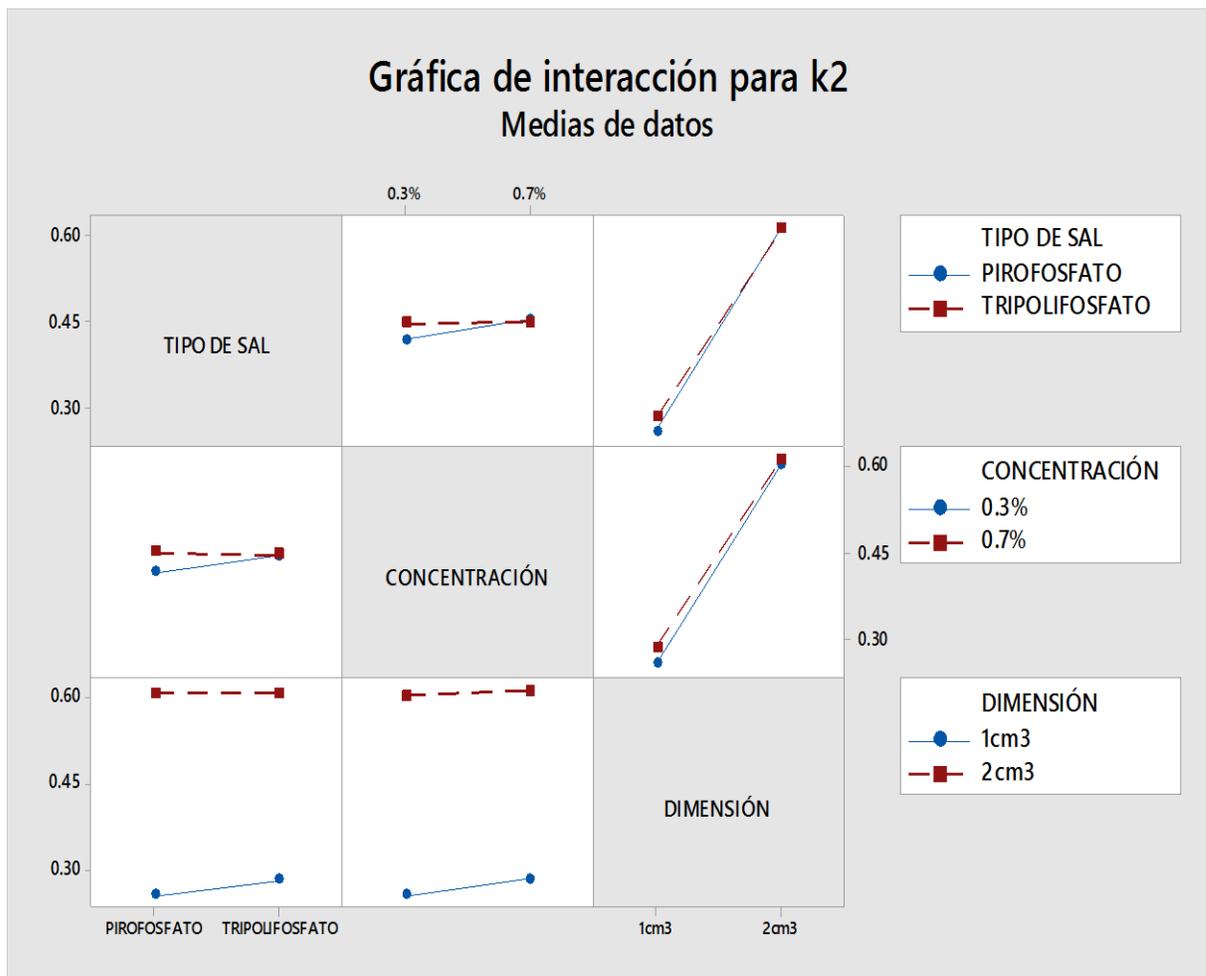


Figura 44. Interacción para la constante 1 según el modelo de Peleg

En el Figura 44, se aprecia la interacción del parámetro cinético k_2 respecto a las diferentes variables. La principal interacción se presenta en la dimensión de 2 cm^3 a una concentración de 0.7%. De acuerdo con algunos autores (Corzo, Ramírez y Brach 2008; Vázquez, Chenlo, Moreira y Riva 2007) y a los resultados obtenidos durante la experimentación podemos inferir que la constante k_2 es característica propia de cada alimento con la que se define el contenido en humedad de equilibrio; a mayor k_2 menor será la capacidad de absorción de agua.

La constante k_2 es característica del alimento, por lo que sus valores son muy similares para cada tipo de tratamiento. Este parámetro define el contenido de humedad en el equilibrio y por ello a menor k_2 , mayor cantidad de agua retiene el alimento al ser rehidratado.

De acuerdo a lo anterior, determinamos que la capacidad de absorción del agua hace referencia a la cantidad de agua absorbida durante la rehidratación con respecto a la eliminada durante el proceso de liofilización.

Para un mismo proceso, este segundo término es constante a lo largo de la rehidratación, por lo que el parámetro aumenta con el tiempo de rehidratación ya que la cantidad de agua absorbida aumenta a lo largo del tratamiento. Al igual que la constante k_1 , en esta constante se presentan valores superiores en la dimensión de 2 cm^3 y en la sal de tripolifosfato de sodio.

3.2.6.2 Modelos predictivos

En la Figura 45 se puede observar que el comportamiento es similar para cada condición experimental con la que se trabajó, las muestras de 2 cm^3 difieren significativamente a las de las muestras de 1 cm^3 , por el contrario, al comparar la influencia del tipo de sal o la concentración no se encontraron diferencias significativas.

Se puede denotar que en la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante, resultados que coinciden con lo reportado por Marin, 2006.

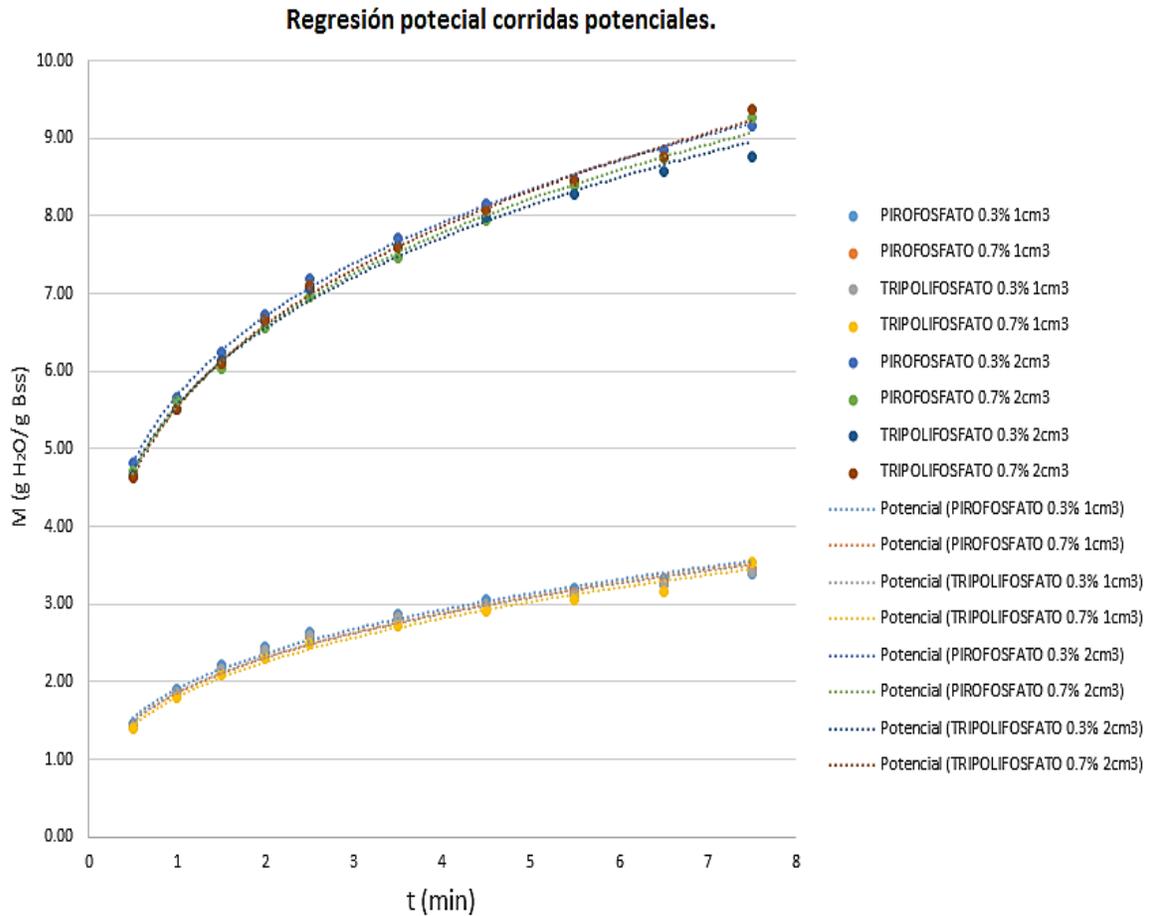


Figura 45. Modelos predictivos para rehidratación de pechuga de pavo liofilizada

La absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos (Krokida, 2003), de esta manera podemos explicar que las muestras de 2 cm³ tiene una menor velocidad de rehidratación.

Al incrementar la concentración de las sales, la retención del agua aumentará por la afectación estructural principalmente en las partes hidrofóbicas de las proteínas aumentando considerablemente los parámetros cinéticos de transferencia de masas durante la rehidratación.

Se realizó dicha regresión con la finalidad de poder predecir el comportamiento al emplear condiciones específicas de rehidratación donde únicamente se sustituirían los valores del peso a un tiempo determinado en la expresión $y = mx^b$.

En el Cuadro 23 se puede apreciar que las muestras de 1 cm³ tienen valores superiores de b, esto quiere decir que a medida que el tamaño de la muestra sea inferior, la velocidad de rehidratación aumentará y los valores de “m” se reducirán, por lo tanto, el tiempo para que las muestras alcancen el equilibrio disminuirá.

Cuadro 23. Valores de la regresión potencial para aplicación de modelos predictivos.

CONDICIÓN	MODELO PREDICTIVO		
	m	b	r ²
PIROF. 0.3% 1 cm ³	1.8497	0.309	0.9861
PIROF. 0.7% 1 cm ³	1.8564	0.3181	0.9901
TRIP. 0.3% 1 cm ³	1.8629	0.3141	0.9874
TRIP. 0.7% 1 cm ³	1.8745	0.3227	0.9962
PIROF. 0.3% 2 cm ³	5.6915	0.2383	0.9987
PIROF. 0.7% 2 cm ³	5.5559	0.2434	0.9974
TRIP. 0.3% 2 cm ³	5.5683	0.2362	0.995
TRIP. 0.7% 2 cm ³	5.536	0.2537	0.9977

Como se ha relacionado anteriormente, la sal de tripolifosfato de sodio en las muestras de 1 cm³ mostró valores inferiores de “m”, por lo que podemos inferir que las sales de tripolifosfato aumentan la velocidad de rehidratación, mientras que de la concentración deducimos que a medida que esta aumente, aumentara significativamente este parámetro cinético. Por otra parte, se realizó la regresión potencial al modelo de Peleg para determinar el comportamiento para cada tratamiento obteniéndose valores de “m” y “b” para una expresión $y = mx^b$, donde la geometría y la concentración de las sales son las principales variables que afectaron la velocidad de rehidratación, dada por los valores de “b”, mientras que “m” nos indica la velocidad a la que se alcanza el equilibrio. Al realizar la regresión potencial de acuerdo al modelo de Peleg podemos observar que este modelo se ajusta a las condiciones de trabajo ya que se obtuvieron valores de regresión promedio de 0.99.

4. CONCLUSIONES

- La liofilización es un método eficiente para la conservación de la carne, ya que se llegó a valores de a_w por debajo de 0.1 en las muestras liofilizadas tanto en las 1 cm^3 como en las de 2 cm^3 , pero tiene afectaciones dentro de sistemas proteicos ya que modifica valores dentro de los parámetros de calidad que no se alcanzan al rehidratar el producto liofilizado en comparación con los valores de la carne fresca.
- Se obtuvieron valores mayores de dureza de las muestras liofilizadas-rehidratadas en comparación a los obtenidos de la muestra fresca, lo que nos indica que al extraer el agua ligada durante el proceso de liofilización daña estructuralmente al alimento (principalmente a nivel proteico) dando como resultado un alimento menos rehidratado y como consecuencia más duro.
- Debido a la diferente estructura (pirofosfato y tripolifosfato de sodio) y a los cambios producidos en las muestras rehidratadas y de acuerdo con Anjaneyulu y Sharma (1989), el tipo de sal que se emplea durante el fenómeno de rehidratación junto con su concentración, determinan las características físicas y fisicoquímicas del producto final.
- El pH del producto rehidratado está directamente relacionado con el tipo de sal y su concentración, a concentraciones de 0.7% se obtiene un aumento de pH de hasta 0.5 unidades aproximadamente, mientras que concentraciones de 0.3% aumenta en 0.3 unidades. El tipo de sal que se recomienda emplear al rehidratar es el Tripolifosfato a una concentración de 0.7%. El pH puede producir que desaparezcan algunas cargas positivas que determinan la repulsión de los filamentos dejando más espacio a las moléculas de agua. De la misma forma el exceso de cargas positivas a bajos valores de pH, provoca la repulsión y aumenta el espacio entre las moléculas de agua y por tanto aumentan de volumen los miofilamentos. La fijación de agua se encuentra en el nivel más bajo a un pH de 5.0 a 5.2 (punto isoeléctrico de la actomiosina), por lo que a medida que incrementa el pH (por encima de 5.2 unidades) existirá una mejor captación de agua dentro del sistema proteico. Los datos experimentales obtenidos para la muestra fresca de carne de pavo coinciden con los valores reportados por Ordoñez (1998), donde el pH obtenido para carnes blancas se encuentra en un intervalo de entre 6.1 – 5.8 unidades.

- Son dos los efectos que se presentan al añadir sales a un sistema de proteínas: se producen interacciones electrostáticas de las sales con los residuos de aminoácidos cargados que en general se considera que estabilizan el plegamiento original de la molécula cuando se encuentran en bajas concentraciones, lo cual es lógico si se considera que las enzimas y proteínas en los organismos se encuentran rodeadas de un ambiente con concentración salina fisiológica. El mecanismo consiste en que los diferentes iones logran estructurar en mayor o en menor grado a las moléculas de agua a su alrededor, causando una interacción indirecta con la proteína. Por lo tanto, la conformación tridimensional de las proteínas y su estabilidad se ve influida no sólo por la concentración, sino por la clase de iones presentes. Por la formación de puentes de hidrogeno, provocan el ordenamiento del agua a su alrededor, lo que produce un cambio en las propiedades de hidratación de las moléculas de proteína y en la estructuración de la interface agua-proteína. En conclusión, el efecto de las sales está relacionado con la desestabilización de las interacciones hidrofóbicas intermoleculares y la estabilización de esas zonas hidrofóbicas ahora expuestas con las moléculas de agua y las sales que rompen estructura.
- Los valores bajos de CRA. es consecuencia de la pérdida de atracción eléctrica de los dipolos o de las moléculas de agua y de la falta de espacio entre las proteínas miofibrilares. Al elevar el pH aumentan las cargas negativas, las moléculas de proteína se repelen entre sí y la matriz proteica se ensancha. Al mismo tiempo se incrementa la fuerza de atracción eléctrica de los dipolos de agua, lo cual ocasiona una elevación de la capacidad de retención de agua, por lo que al incrementar el pH, se incrementaran los valores de capacidad de retención de agua.
- El color de la carne se ve afectado durante el proceso de liofilización-rehidratación, bajo ninguna condición experimental se logró obtener los mismo valores que los de la pechuga de pavo fresca, lo que nos indica que durante la liofilización hay repercusiones estructurales a nivel proteico que se ven reflejadas al rehidratar. El parámetro $L^*(A)$ se correlacionó con el grado de rehidratación de la muestras, en muestras menos hidratadas, los valores de este estímulo son mayores, mientras que el tono a^* y b^* se relacionaron con el estado químico de los pigmentos e la carne, principalmente la mioglobina (Mb, de color rojo púrpura; oximioglobina, MbO₂, de color rojo vivo; metamioglobina, MetMb, de color pardo), por lo que al incrementar el pH, los valores de estos estímulos disminuyen acercándose más a los

valores de la muestra fresca. De acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente, el estímulo $L^*(A)$ y a^* disminuyeron al incrementar los valores de pH, tal y como lo reporta Brewer (2006), por lo que se puede determinar que hay una relación directamente proporcional entre el color y el pH.

- El modelo de Peleg se ajustó al tratamiento de datos durante la rehidratación los cuales dieron respuesta a los fenómenos de transferencia de masa presentes durante este proceso y en donde se calcularon las constantes de Peleg k_1 y k_2 , que representan a la velocidad y la capacidad de absorción hasta el equilibrio, respectivamente. El procedimiento para la obtención de los valores de estas constantes coincide con el realizado por Paredes (2012). Por otra parte, se concluye que estas constantes se ven afectadas por las dimensiones (1 cm^3 y 2 cm^3) de las muestras rehidratadas, a medida que aumenta esta variable, los valores de estas constantes aumentan. El modelo de rehidratación empleado para la cinética de rehidratación coincide con el reportado con Vega (2003), donde el modelo potencial se ajusta a los datos obtenidos y a las condiciones en las que se realizó la rehidratación.
- Se diseñaron modelos de rehidratación los cuales están en función de las características de este proceso (temperatura de congelación -49°C , tiempo 24 h, presión del liofilizador 0.035 mbar, temperatura -49°C , tiempo 24 h, temperatura de rehidratación: 40°C , tiempo 7.5 minutos, solución de reconstitución, pirofosfato y tripolifosfato de sodio a 0.3 y 0.7%) y están ajustado de acuerdo al modelo de Peleg para fundamentar fenómenos de transferencia de materia.
- La liofilización y rehidratación de alimentos son operaciones unitarias complejas que proporcionan una gran diversidad de productos (frutos y hortalizas deshidratadas, tés) los cuales, presentan cambios a nivel microestructural, de carácter sensorial y de mayor importancia nutricional; es por ello, que el campo de la ciencia, tecnología e ingeniería de alimentos deben encontrar las combinaciones necesarias de tratamientos, para mejorar las características funcionales y estructurales, junto con la estabilización y calidad final de los alimentos. A lo anterior se debe sumar las nuevas tecnologías emergentes que otorgan alimentos de mejor calidad nutricional, y nuevos instrumentos que sirven para medir estas características.

RECOMENDACIONES

El modelo de Peleg, tal y como lo referencia Hamm (1960), debe emplearse en sistema en donde las condiciones de rehidratación no afecten al sistema proteico (que no ocurra desnaturalización) ni a los carbohidratos (según sea el sistema alimenticio), por lo que al emplear este modelo, la solución reconstituyente no debe de exceder una temperatura de 50°C si se trabaja con carne o soja y una temperatura de 80°C si se trabaja con frutas u hortalizas.

Los modelos matemáticos desarrollados se pueden emplear al trabajar bajo las mismas condiciones de proceso (congelación, liofilización y rehidratación) y de la muestra (geometría y dimensión), así como las concentraciones y tipo de sal, según sea el modelo a aplicar.

Al emplear sales de pirofosfato como de tripolifosfato de sodio, por norma, las concentraciones de la solución reconstituyente no deben exceder el 0.7%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aider, M., Halleux, D. (2009). Cryoconcentration technology in the bio-food industry: Principles and applications. *LWT* 42 (3), 679-685.
- Aguilera J.M. Stanley D.W. (2001). Simultaneous Heat and Mass Transfer: Dehydration. *Microstructural Principles Food Proc Engineering*; 9: 373-407.
- AMSA (2012). Guidelines for meat color evaluation American Meat Science. Chicago IL: Association National Live Stock and Meat Board.
- Andorit I., Le Quére J.L. (2004). Interactions between melanoidins and flavor compounds impact of freeze-drying (method and time) and roasting degree of coffee on melanoidins retention capacity. *Food chemistry* 85, 289-294.
- Andújar, G., Pérez, D., Venegas, O. (2009). Química y bioquímica de la carne y productos cárnicos. Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia, La Habana. Cuba. pp128.
- Anzaldúa-Morales A. (1994). La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
- AOAC. (1991). Official methods of analysis. 14th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Asghar, J.L. Gray, A.M. Buckley, A.M. Pearson, A.M. (1988). Booren Perspectives on warmed-over-flavor. *Food Technology*, 42 (6), pp. 102–108.
- Ayla Soyer, Berna Özalp. (2010). Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat. *Food Chemistry*. 120 (4) , pp 1025–1030.
- Badui, D. (2006). Química de los alimentos. Cuarta edición. Pearson. México. Páginas 736.
- Bailey, A. J. (1982). Muscle proteins and muscle structure. En *Food Proteins*. P. F. Fox y J. J. Condon, eds. P. 245. App. Sci. Publishers, London.

- Bailey AJ, Light ND. (1989). *Connective Tissue in Meat and Meat Products*. Elsevier Applied Science. London.
- Bandman, E y Shelton, G. D. (1983). Development of a unique myosin isozyme pattern in the chicken gastrocnemius. *Cell biology*. 97: 50a
- Barbosa C. Gustavo, Vega Mercado Humberto (2000). *Deshidratación de alimentos*. Madrid, España. Ed. Acribia. Pp 314.
- Barioglio, C.F. (2004). *Diccionario de producción animal*. Brujas, Argentina. 231.
- Bendall, J. R., y Swatland, H. J. (1988). A review of the relationships of pH with physical aspects of pork quality. *Meat Science*, 24(2), 85–126.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., y Stryer, L. (2002). *A review of the relationships of pH with chemical aspects of pork quality Biochemistry (5th ed.)*. New York, NY: W.H. Freeman and Company.
- Bilbao-Sáinz C. Andrés A. Fito P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions, *J Food Engineering* ; 68: 369-376.
- Boeh-Ocansey, O., (1984). Effects of vacuum and atmospheric freeze-drying on quality of shrimp, turkey flesh and carrot samples. *Food Sci.* 49 (6), 1457-1461.
- Borderias, A. y Montero, P. (1988). Fundamentos de la funcionalidad de las proteínas en alimentos. *Revista de agroquímica y tecnología de alimentos*. 28: 159- 169.
- Braña, D. Ramirez, E. Rubio, L. Sanchez, E. Torrescano, U. Arenas, M. Partida, P. Ponce, A. Rios, R. (2011). *Manual de análisis de calidad en muestras de carne*. Centro nacional de investigación disciplinaria en fisiología y mejoramiento animal. 11: 21-28.
- Brewer, Novakofski y Freise (2006). Instrumental evaluation of pH effects on ability of pork chops to Bloom. *Meat Science* 72 596–602.
- Chou, D. y Morr, C. (1979). Protein- water interactions and functional properties. *Journal of the american Oil Chemists Society*. 59: p. 53-62

- Christie J. Geankoplis. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. editorial continental, 3ra edición. México D.F.
- CIE (1978). Recommendations on uniform color spaces-color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication No. 15 (E-1.3.1) 1971/(TC-1-3). Commission Internationale de l'Eclairage, Paris.
- Coria Hernandez, J. (2011). Evaluacion del efecto de la liofilización- hidratación en las proteínas miofibrilares en carne de cerdo fresca y cocida. UNAM, México.
- Cortés Cortés Manuel, Iglesias León Miriam. (2004). Generalidades sobre Metodología de la Investigación, 1ra edición, Campeche, México.
- Damodaran, S. Kinsella, J.E. (1982). Food Protein Deterioration: mechanisms and function ality. Food Chemistry. 45: 440-444
- Decker, E.A. Xiong, Y.L. Calvert, J. T. Crum, A.D. (1993). Chemical, physical, and functional properties of oxidized turkey White muscle myofibrillar proteins. Journal of agricultural and food chemistry. 18: p 124-148
- E.A. Decker, Y.L. Xiong, J.T. Calvert, A.D. Crum, S.P. (1993). Blanchard Chemical, physical and functional properties of oxidized turkey white muscle myofibrillar proteins. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 41, pp. 186–189.
- E. Puolanne, Marjo Halonen. (2010). Theoretical aspects of water-holding in meat. *Meat Science* 86, pp. 151–165
- Ezequiel, F., Valle, F. G., Vázquez, S. N. y Velázquez, A. (1983). Parámetros productivos y reproductivos del guajolote criollo (*Meleagris gallopavo*). México: Tesis de licenciatura en zootecnia. Universidad autónoma de Chapingo.
- E.R. Stadtman. (1990). Metal ion-catalysed oxidation of proteins: Biochemical mechanism and biological consequences. *Free Radical Biology and Medicine*, 8, pp. 315–325.
- FAO/OMS. (1992). Evaluación de la calidad de las proteínas. Informe de una Consulta de Expertos FAO/OMS. Estudio FAO de Alimentación, y Nutrición No. 51. FAO, Roma.

- Farchmin, G. (1967). Inspección veterinaria de los alimentos. Acribia, Zaragoza. 52-61, 185, 202-205.
- Fenemma , R. O. Damodaran, S. (2010). Química de los alimentos. Zaragoza, España. Editorial Acribia. Pp 1166.
- Fisher, A. (1994). Tecnología e higiene de la carne. Tecnología de la producción y elaboración de productos cárnicos. Trad. Escobar J, et al. Zaragoza. España. Editorial Acribia S.A. p. 522
- Flores J. y Bermell S. (1984). Propiedades funcionales de las proteínas miofibrilares: capacidad de retención de agua. *Agroquímica tecnología de alimentos*. 24: p. 151-158.
- Flosdorf, E.W., (1949). Freeze-Drying. Reinhold, New York, NY.
- Forrest, J. C.; Aberle, E. D.; Hedrick, H. B.; Judge, M. D. y Merkel, R. A. (2012). Principles of Meat Science. 5th edition. Edit. Kendall Hunt Publishing Company. Pp 395.
- Garcia, J. Rafael (2017). Diseño de una estrategia de control difuso aplicada al proceso de ultra congelación de alimentos. Scielo. Vol. 25 (1).
- Gordon, A. y Barbut, S. (1990). The role of the interfacial protein film in meat batter sabilization. Food structure. 9: p. 22-35.
- Grau, R. (1971). La investigación de la ciencia de la carne. Acribia, Zaragoza, España. Pp 473.
- Greaser, M. L.; Wang, J. M. y Lemanski, L. F. 1981. New myofibrillar proteins. Proc. Recip. Meat Conf. 34, 12-16.
- Goll, D. E., Otsuka, Y., Nagainis, P. A., Shannon, J. D. y Muguruma, M. (1983). Role of muscle proteinases in maintenance of muscle integrity and mass. *J. Food Biochemistry*. 7: 137.
- Hamm R. (1986). Functional properties of the myofibrillar system and their measurements. En: Bechtel PJ editor. Muscle as food. Orlando, Florida, USA: Academic Press: 135.
- Hamm, R. (1960). Biochemistry of meat hydration. Adv. Food Res. 10, 355.
- Harper, J. C. y Tappel, A. L. (1957). Freeze-drying of food products. *Advances in food research*, 7, 195

- Hernández Sampieri, Roberto. 2001. Metodología de la Investigación. 2ª. ed. McGraw-Hill. México, D.F. Pág. 52 - 134.
- Hoffmann, K. (1977). Die wasserbindung des fleisches und ihre messung. Die Fleischwirtschaft 4: p. 727- 745.
- Ho, Y.S. y Mckay, G. (2000). The kinetics of sorption of divalent metal ion onto sphagnum moss peat. Elsevier science 34: pp. 735-742.
- Hoinikel, K.O. (1988). Capacidad de retención de agua en la carne. *Fleisch Wirtschaft*. No 1; p. 11 – 22.
- Huidobro, A. y Tejada, M. (1993). Emulsifying capacity of fish mince from several species during frozen storage. *Journal science of food agriculture*. 61: p. 33-338.
- HunterLab (2000). What is color and how is measured? Insight on color (Vol. 12, No. 5) <http://www.hunterlab.com/appnotes/an05_00.pdf>. Accessed June 28, 2005.
- Jason K. Apple and Janeal W.S. Yancey. (2013). Water-Holding Capacity of Meat. *The Science of Meat Quality*. First edition. Pag. 119-145
- Jelena Babic a, Mari a J. Cantalejo b, Cristina Arroqui. (2009). The effects of freeze-drying process parameters on Broiler chicken breast meat. *LWT - Food Science and Technology*. 42. Pp 1325–1334.
- J.G. Sebranek. (1982). Use of cryogenics for muscle foods. *Food Technology*, 36 (4) , pp. 121–127.
- J. Pikul, D.E. Leszczynski, F.A. (1985). Kummerow Oxidation products in chicken meat after frozen storage, microwave and convection oven cooking, refrigerated storage, and reheating. *Poultry Science*, 64, pp. 93–100.
- Jong-Whan Rhim , Somi Koh, Jeong-Mok Kim. (2011). Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge. *Journal of Food Engineering*. 104. Pag. 484- 491.

- Johnson JL. (1994). Pathogen microorganisms and microbial toxins associated with muscle foods. En: Kinsman DM, Kotula AW, Breidestein BC. Muscle foods meat, poultry and seafood technology. USA: Chapman and Hall, 1994.
- Jowitt, R. (1974). The terminology of food texture. *Journal of texture studies*. 10: 1-20
- Karel, M., (1975). Heat and mass transfer in freeze drying. In: Goldblith, S.A., Rey, L., Rothmayr, W.W. (Eds.), *Freeze Drying and Advanced Food Technology*. Academic Press, London.
- Karl O. Honikel. (1998). Reference Methods for the Assessment of Physical Characteristics of Meat. *Meat Science*, 49 , (4), pag.447- 457
- K. Vasanth, KumarHiléia K.S. Souza, V.K. Gupta. (2011). On the initial reaction rate of Peleg's model for rehydration kinetics. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 42(2). 278–280.
- Kaymak-Ertekin E. (2000). Drying and rehydration kinetics of green and red peppers, *J Food Science*; 67(1): 168-175.
- Khalloufi, S. Robert, J. y Ratti, C. (2005). A mathematical model for freeze- drying simulation of biological materials. *Journal of food process engineering*. 28: 107-132.
- Khalloufi, S. y Ratti, C. (2003). Quality deterioration of freeze dried foods as explained by their glass transition temperatura and internal structure. *Journal of food science*. 68: 892- 903.
- Knipe, L. (2004). *Usos de fosfatos en productos cárnicos PDF*. Revisión electrónica.
- Kramer, A. (1973). Definition, measurement and relation to other food quality attributes. *Food texture*. P. 1-9
- Krokida M.K. Marinos-Kouris D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products, *J Food Engineering*; 57: 1-7.
- Krokida M.K. Maroulis Z.B. (2001). Structural properties of dehydrated products during rehydration, *International J Food Science Technol*; 36:529-538.

- Labuza, T.P. Riboh, D. (1983). Theory and applicarion of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods. *Food technology* 36: p 66-74
- Labuza, T.P. Schmid,L. (1985). Accelerated shelf- life testing of foods. *Food technology*. 39: p 57-64.
- Laopoolkit, P. y Suwannaporn, P. (2011). Effect of pretreatments and vacuum drying on instant dried pork process optimization. *Meat Science*. 88: 543-453.
- Lawrie, R. A. (1985). *Meat science*. (4th ed.). Cambridge, England. edit.Pergamon Press. pp 461.
- Lee K.T. Farid M. Nguang S.K. (2006). The mathematical modelling of the Rehydration characteristics of fruits, *J Food Engineering*; 72: 16-23.
- Ledward, D. A. (1992). Color of raw and cooked meat. In D. E. Johnston, M. K. Knight, Y D. A. Ledward (Eds.), *The chemistry of muscle-based foods* (pp. 128–144). Thomas Graham House, Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Levine, R.L., Garland, D. Oliver, C.N. Amici, A. Climent, I. Lenz, A.G. Ahn, B.W. Shaltiel, S. Standtman, E.R. (1990). Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Methods Enzymol*. 464 – 78.
- Lewicki PP. (1998 a). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue propertie: a review, *Internat J Food Properties*; 1: 1-22.
- Lewicki P.P. (1998 b). Some remarks on Rehydration of dried foods, *J Food Engineering*; 36: 81-87.
- Lusby, M. L., Ridpath, J. F., Parrish, F.C. y Robson, R. M. (1983). Effect to pos mortem storage en the degradation of the myofibrillar protein titin in bovine longissimus muscle. *J. Food Sciencie*. 48, 1787.
- Marabi A. Dilak C. Shah J. Saguy I.S. (2004). Kinetic of solids leaching during rehydration of particulate dry vegetables, *J Food Science* ; 69: 3.
- Marin, G. Rodriguez, M. (1999). *Fisicoquímicas de agua*. Primera edición. Edit. Diaz de Santos. Madrid, España. P. 467.

Marsh, B. Leet, N. (1966). Studies in meat tenderness. The effects of cold shortening on tenderness. *Food Science*. 31: 450- 459.

Morrissey, Sheehy, Galvin, Kerry, y Buckley, (1998). Lipid stability in meat and meat products. *Meat science*. 49: p. 73-86.

Morzell, M.; Chambon, C.; Hamelin, M. y Monin, G. (2004). Proteome changes during pork meat ageing following use two different pre- slaughter handling procedures. *Meat Science*. 67 (4): 689-696.

M.S. Brewer a, J. Novakofski, K. Freise (2006). Instrumental evaluation of pH effects on ability of pork chops to Bloom. *Meat Science*. 72. Pag. 596–602.

Muñoz, N. Garcia-Gil, J. Arnau, P. Gou (2012). Rehydration kinetics at 5 and 15 °C of dry salted meat. *Journal of Food Engineering*. 110. Pp 465–471

NORMA Oficial Mexicana NOM-009-Z00-1994, Proceso sanitario de la carne.

NORMA Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida.

NORMA Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2002, Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.

NOM-194-SSA1-2004 Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos.

Oetjen, G.-W., Haseley, P., (2004). *Freeze Drying*, second ed. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.

Okos, M. R. Narsimhan, G. Singh, R. K. y Weitnauer, A.C. (1992). Doof dehydration. *Food engineering*. 501-507.

Ordoñez, P (1998). Efecto de la refrigeración en las industrias cárnicas. Editorial Acirbia España. 1ra edición. Pag. 185.

Orrego A. (2008). Congelación y liofilización de alimentos. Editorial Tizan. Manizales, caldas, Colombia. Primera edición, 172.

- Paredes, E. y Quiroz, M. (2012). Aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero. *Agroindustrial Science*. 1. 91-99
- Pascual P. Sanjuan N. Melis R. Mulet A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modeling, *Food Engineering*; 72: 346-353.
- Peleg M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Food science*. Volume 53, Issue 4 Pages 1216–1217
- Penny, I.F. (1980). The enzymology of condtining, en *Developments in Meat Science*. *Meat Science* -1. 115-143
- Pikul, J. Leszczynski, D.E., Niewiarowicz, A. y Kummerow, F.A (1984). Lipid oxidation in chicken breast and leg meat after sequential treatments of frozen storage, cooking, refrigerated storage, and reheating. *Food technology*. 19: 575-584.
- Pearson, R. T.; Duff, I. D.; Derbyshire, W. y Blanshard, J. M. V. (1974). An NMR investigation of rigor in porcine muscle. *Biochem. Biophys. Acta* 362, 365.
- Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Food science*. Volume 53, Issue 4 Pages 1216–1217.
- Pikal, M.J., (2007). Freeze drying, third ed. *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*, vol. 3. Inform Healthcare, New York, NY.
- Potthast, k. (1987). Color de la carne, estabilidad en el color y cambios en coloración. *Fleischwirtschaft*. 67: 5 -50
- Poulson Josepha, Surendranath P. Sumana, Shuting Lia, James R. Clausb, Michele Fontainec, Laurey Steinkec. (2011). Primary structure of turkey myoglobin. *Food Chemistry*. Volume 129 (1), Pages 175–178.
- Price J. F. y Schweigert, B. S. (1986). *La ciencia de la carne y los productos cárnicos*. Acribia, Zaragoza.Madrid, España. Pp 668.

- Pollard, T. D., y Weihing, R. R. (1974). Actin and myosin and cell movement. *Biochemistry*. 2: 1-65.
- Rastogi N.K. Niranjana K. Enhanced. (1998). Mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple, *J Food Science*; 63 (3): 508-511.
- Rastogi N.K. Nayak C.A. Raghavarao M.S. (2004). Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots, *J Food Engineering*; 65: 287-292.
- Ratti, C., (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *J. Food Eng.* 49 (4), 311-319.
- Resio, A.C. Aguirre, R.J. Suarez, C. (2006). Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of food engineering*. 72: 247-253.
- Restrepo Molina D.; Arango Mejía C.; Restrepo Digiammarco R.; Amezcua Campuzano A. (2001). *Industria de Carnes*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 1-8p, 100-120p
- R.L. Levine, D. Garland, C.N. Oliver, A. Amici, I. Climent, A.G. Lenz, (1990). Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Method in Enzymology*, 186, pp. 464-477.
- Rosenthal, J. (1999). Relation between instrumental and sensory measures of food texture. *Food Texture: measurement and perception*. P. 1-17.
- R. Warner. (2014). Measurement of meat quality, measurements of water-holding capacity and color: objective and subjective. *Encyclopedia of meat sciences* (second edition). pag. 164-171.
- S. Barbut (1993). Color measurements for evaluating the pale soft exudative (PSE) occurrences in turkey meat. *Food Research International*, 26, pp. 39-43
- Sañudo C, Albertí P, Franco J, Olleta JL, Campo MM y Panea B. (1999). Calidad Instrumental de la carne de siete razas bovinas españolas. *Eurocarne* 1999; 73: 37-54.
- Sebranek, J. G. (1982). Use of cryogenics for muscle foods. *Food technology*. 36: 120- 127

- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2017). Consultado 20/05/2017 en: <http://www.sagarpa.gob.mx/JAC0507-20.aspx>
- Simatos, D., Blond, G., (1975). The porous texture of freeze dried products. In: Goldblith, S. A., Rey, L., Rothmayr, W.W. (Eds.), *Freeze Drying and Advanced Food Technology*. Academic Press, London, UK
- Schubert H. (2003). Rehydration of food powders, *J Food Science and Technol Internat*; 9 (3): 223-235.
- Schut, J. (1976). Meat emulsions. In *food Emulsions*. New York. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. Volumen 6.
- S. R. Anjaneyulu, N. Sharma & N. Kondaiah. (1989). Evaluation of Salt, Polyphosphates and their Blends at Different Levels on Physicochemical Properties of Buffalo Meat and Patties. *Meat Science*, 25, pp 293-306.
- Shantiel, W. Standman, E.R. (1990). Determination of carboxyl content in oxidatively modified proteins. *Methods enzymol*. 186: 464-478.
- Sopade, P. A. y Kaimur, K. (1999). Application of Peleg's equation in desorption studies of food systems: a case study with sago (*Metroxylon Sagu rottb.*) starch. *Drying Technology*, 17, 975-989.
- Stickland, N. C. (1983). Growth and development of muscle fibres in the rainbow trout. *J. anat*. 137, 323-333.
- Swatland HJ. (1991). *Estructura y desarrollo de los animales de abasto*. Zaragoza, España: Editorial Acibia, S.A: 373
- Thomsen HH, Zeuthen P. (1988). The influence of mechanically deboned meat and pH on the water holding capacity and texture of emulsion type meat products. *Meat Sci.* ;22:189–201.
- USDA. National Nutrient Database for Standard (2008).: Release 21. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

- Vega A. Lemus R. (2006). Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*), *Rev Información Tecnol*; 27(3): 23-31.
- Vega A. (2003). Estudio de la deshidratación y rehidratación del pimiento rojo (*Capsicum Annuum* L.) var. Lamuyo. (Tesis Doctoral) Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España.
- Warris, P. D. y Rhodes, D. N. (1977). Haemoglobin concentration in beef. *Journal of the science of food agriculture*. 28: 303-314.
- Weerts A.H. Martin D.R. Lian G. Melrose J.R. (2006). Modelling the hydration of foodstuffs, *Simulation Modelling Practice and Theory* ; 13: 119-128.
- Wierbicki, E. (1963). Determination of meat swelling as a method for investigating the water binding capacity of muscle proteins with low water-holding force. *Fleischwirtschaft* 15, 404
- Wismer- Pedersen, J. (1986). Química de los tejidos animales. Parte 5. Agua. En Price, J. F. y Schweigert, B. S. (1986) *La Ciencia de la Carne y de los productos cárnicos*. Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Xia X., Kong B., Liu Q., Liu J (2009). Physicochemical change and protein oxidation in porcine longissimus dorsi as influenced by different freeze- thaw cycles. *Meat Science*. 05, 360.
- Xiong Y.L. (2000). Protein oxidation and implications for muscle foods quality. E.A. Decker, C. Faustman, C.J. Lopez-Bote (Eds.), *Antioxidants in muscle foods*, Wiley, New York, pp. 85–111.
- Yates, L. y Greaser, M. L. (1983). *Quantitated determination of myosin and actin in rabbit skeletal muscle*. *J. Biol. Chem.* 238, 2374- 2385
- Yendi I. Melquíades, Clara López y Marta E. Rosas. (2009). Estudio de la Cinética de Rehidratación de Zanahoria (*Daucus Carota*) Deshidratadas. *Información tecnológica*. 20 (3). Pag 65-72.
- Zeki Berk (2013). Chapter 23 – Freeze Drying (Lyophilization) and Freeze Concentration. *Food Science and Technology*. 2. pp567–581.

Zhu, L. G., Bidner, B., y Brewer, M. S. (2001). Postmortem pH, muscle, and refrigerated storage effects on ability of vacuum-packaged pork to bloom. *Journal of Food Science*, 66(8), 1230–1235.

Zhu, L. G., y Brewer, M. S. (1999). Relationship between instrumental and sensory color evaluation in a raw, fresh beef and chicken model system. *Journal of Muscle Foods*, 10(2), 131–146.