



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“ALMIDÓN EXTRUDIDO DE HABA (*VICIA FABA L.*) Y LENTEJA (*LENS CULINARIS*) EN LA ELABORACIÓN DE DOS PRODUCTOS CÁRNICOS A BASE DE CARNE DE CERDO DE DIFERENTE CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA”

TESIS COLECTIVA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTAN

JIMENA ZARAZÚA ACOSTA

TERESA ISABEL GARCIA OLVERA

DIRIGIDA POR

DRA. MAYRA ESTHELA GONZÁLEZ MENDOZA

CO-DIRIGIDA POR

DR. LUIS HUMBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2026.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“ALMIDÓN EXTRUDIDO DE HABA (*VICIA FABA L.*) Y LENTEJA (*LENS CULINARIS*) EN LA ELABORACIÓN DE DOS PRODUCTOS CÁRNICOS A BASE DE CARNE DE CERDO DE DIFERENTE CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA”

TESIS COLECTIVA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

JIMENA ZARAZÚA ACOSTA TERESA

ISABEL GARCIA OLVERA

DIRIGIDA POR

DRA. MAYRA ESTHELA GONZÁLEZ MENDOZA
CO-DIRIGIDA POR

DR. LUIS HUMBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ

Sinodales

DRA. MAYRA ESTHELA GONZÁLEZ MENDOZA
DIRECTORA

DR. LUIS HUMBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ
CO-DIRECTOR

DRA. SILVIA LORENA AMAYA LLANO
SINODAL

DRA. BENERANDA MURUA PAGOLA
SINODAL

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
II.1 Consumo de productos cárnicos en México	2
II.2 Jamón	3
II.2.1 Clasificación comercial del jamón	3
II.3 Chorizo	5
II.4 Materia prima para la elaboración de productos cárnicos	6
II.5 Componentes de la carne	6
II.5.1 Agua	6
II.5.2 Proteínas	6
II.5.3 Grasa	7
II.5.4 Carbohidratos	8
II.5.5 Minerales	8
II.5.6 Vitaminas	8
II.6 Características tecnológicas de la carne	9
II.6.1 Defectos en la carne	10
II.6.1.1 Carne PSE	10
II.7 Uso de almidones en la elaboración de productos cárnicos	12
II.7.1 Fuentes de almidón no convencionales	13
II.7.2 Modificaciones de los almidones	14
II.7.3 Almidones succinatados	15
II.7.4 Extrusión reactiva para almidón OSA	16
III. OBJETIVOS	18
III.1 Objetivo general	18
III.2 Objetivos específicos	18
IV. METODOLOGÍA	19
IV.1 Extracción del almidón de leguminosa	19
IV.1.1 Caracterización del almidón nativo de leguminosa	19
IV.1.1.1 Perfil de viscosidad	19
IV.1.1.2 Microscopía electrónica de barrido	20
IV.1.1.3 Espectroscopia infrarroja	20
IV.2 Extrusión reactiva del almidón de leguminosa	20
IV.2.1 Caracterización del almidón modificado	21
IV.2.1.1 Perfil de viscosidad	21
IV.2.1.2 Microscopía electrónica de barrido	21

IV.2.1.3	Espectroscopia infrarroja	21
IV.3	Elaboración de los productos cárnicos	21
IV.3.1	Formulación y elaboración de jamón de cerdo	22
IV.3.2	Formulación y elaboración de chorizo de cerdo	23
IV.4	Determinaciones para jamón de cerdo	24
IV.4.1	Color, pH y temperatura	24
IV.4.2	Textura	24
IV.4.3	Oxidación lipídica	24
IV.4.4	Oxidación proteica	25
IV.5.	Determinaciones para chorizo de cerdo	25
IV.5.1	Color, pH y temperatura	25
IV.5.2	Textura	25
IV.5.3	Oxidación lipídica	26
IV.5.4	Oxidación proteica	26
IV.6	Vida de anaquel	26
IV.7	Diseño experimental y análisis estadístico	26
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
V.1	Caracterización del almidón nativo y modificado de leguminosa	26
V.1.1	Perfil de viscosidad	26
V.1.2	Microscopía electrónica de barrido	28
V.1.3	Espectroscopia infrarroja	30
V.2	Determinaciones para jamón de cerdo	31
V.2.1	Color, pH y temperatura	31
V.2.2	Textura	36
V.2.3	Oxidación lipídica	41
V.2.4	Oxidación proteica	44
V.3.	Determinaciones para chorizo de cerdo	47
V.3.1	Color, pH y temperatura	47
V.3.2	Textura	52
V.3.3	Oxidación lipídica	60
V.3.4	Oxidación proteica	63
VI.	CONCLUSIONES	67
VII.	BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Denominación comercial del jamón de acuerdo con su especie de origen	4
2	Clasificación del jamón de acuerdo a su aporte de proteína y calidad	4
3	Formulación base para la elaboración de jamón cocido	22
4	Formulación base para la elaboración de chorizo mexicano tradicional	23
5	Parámetros del perfil de viscosidad en almidones de haba y lenteja bajo condiciones control, nativas y modificadas por extrusión química	27
6	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ de las variables de calidad en jamón	32
7	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ de las variables de calidad en jamón	33
8	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de jamón de cerdo	37
9	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de jamón de cerdo	38
10	Ordenada al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo	41
11	Componente lineal del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo	42
12	Componente cuadrático del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo	43
13	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de jamón de cerdo	45
14	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de jamón de cerdo	45
15	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para el pH y las variables de color en chorizo de cerdo	48
16	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para el pH y las variables de color en chorizo de cerdo	49
17	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de chorizo de cerdo	53
18	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de chorizo de cerdo	55
19	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación lipídica de chorizo de cerdo	61
20	Pendiente del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación lipídica de chorizo de cerdo	62
21	Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de chorizo de cerdo	64
22	Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de chorizo de cerdo	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Producción en carne de cerdo	2
2	Perfil de viscosidad en almidones de haba y lenteja bajo condiciones control (extrusión con OSA), nativas y modificadas por extrusión con OSA	28
3	Micrografías SEM del almidón nativo de haba (A) y lenteja (C), almidón extrudido OSA de haba (B) y lenteja (D)	29
4	Espectros de FTIR. A) Almidón de haba y B) Almidón de lenteja	30
5	Modelos de regresión lineal. A) pH; B) luminosidad (L*); C) índice rojo-verde y D) índice amarillo-azul	35
6	Imágenes en el tiempo de los jamones de cerdo. 14 días de almacenamiento a temperatura ambiente	36
7	Modelos de regresión lineal. A) dureza, B) cohesión, C) elasticidad, D) gomosidad y E) masticabilidad en jamones de cerdo	40
8	Modelos de regresión polinomial de segundo grado para TBARS en jamones de cerdo	44
9	Modelos de regresión lineal para oxidación de proteína en jamones de cerdo	46
10	Modelos de regresión lineal. A) pH; B) luminosidad (L*); C) índice rojo-verde y D) índice amarillo-azul	51
11	Imágenes en el tiempo de los chorizos de cerdo	52
12	Modelos de regresión lineal. A) cohesión, B) dureza, C) elasticidad, D) gomosidad y E) masticabilidad en chorizos de cerdo	59
13	Modelos de regresión lineal para TBARS en chorizos de cerdo elaborados con carne normal y PSE, con y sin adición de almidón de haba y lenteja 0 y 5%	63
14	Modelos de regresión lineal para oxidación de proteína en chorizos de cerdo elaborados con carne normal y PSE, con y sin adición de almidón de haba y lenteja 0 y 5%.	65

RESUMEN

El uso de carne de cerdo con defecto PSE (Pale, Soft and Exudative) representa un desafío para la industria cárnica debido a su baja capacidad de retención de agua, elevada exudación y menor funcionalidad tecnológica, lo que afecta la calidad de productos procesados como el jamón cocido y el chorizo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de almidones de haba (*Vicia faba* L.) y lenteja (*Lens culinaris*) modificados mediante extrusión reactiva con anhídrido octenil succínico sobre las propiedades fisicoquímicas y la estabilidad durante el almacenamiento de jamón cocido y chorizo elaborados con carne normal y carne PSE. Los almidones fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido, espectroscopía infrarroja (FTIR), perfil de viscosidad y posteriormente incorporados a las formulaciones bajo un diseño factorial 2^3 , considerando el tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración (0 y 5 %). Durante el almacenamiento se evaluaron pH, color, textura, oxidación lipídica y oxidación proteica. La modificación mediante extrusión reactiva alteró la estructura granular de los almidones, confirmó la incorporación de grupos octenil succinato y modificó sus propiedades funcionales. En los productos cárnicos, la incorporación de los almidones modificados produjo efectos significativos ($p < 0.05$) sobre las propiedades texturales, el color y la evolución de la oxidación durante el almacenamiento. En el jamón, el pH permaneció estable entre 6.10 y 6.22, mientras que en el chorizo los valores iniciales oscilaron entre 5.03 y 5.35, dependiendo del tipo de carne y del tratamiento. Asimismo, los modelos estadísticos mostraron interacciones significativas entre el tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración para las principales variables de calidad evaluadas. Se concluye que los almidones modificados de haba y lenteja obtenidos mediante extrusión reactiva mejoraron la estabilidad fisicoquímica y las propiedades tecnológicas de los productos cárnicos elaborados con carne PSE, constituyendo una alternativa para incrementar el aprovechamiento de esta materia prima en la industria cárnica.

I. INTRODUCCIÓN

Los productos cárnicos son alimentos altamente valorados por los consumidores, gracias a sus características organolépticas. El proceso implica transformaciones complejas que surgen de diversas reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas. Estas transformaciones son determinantes en el producto final, influenciado por factores tanto antes como después del tratamiento, como la calidad de la materia prima y la adición de conservantes. Por otro lado, la carne PSE (Pálido, Suave y Exudativo) presenta características anormales, afectando tanto su apariencia visual como su funcionalidad proteica y su palatabilidad. Los productos elaborados con carne PSE suelen tener bajos rendimientos debido a su limitada capacidad para retener agua, lo cual es consecuencia de la desnaturalización de las proteínas musculares, provocada por un pH bajo y temperaturas elevadas durante el proceso de procesamiento de las canales.

Algunos aditivos que se usan en la industria cárnica para contrarrestar defectos y aumentar rendimientos son las proteínas texturizadas de leguminosas y almidones. Los almidones que generalmente son incorporados a la formulación de productos cárnicos son provenientes de cereales, que poseen una cierta funcionalidad principalmente en la capacidad de retención de agua. La modificación de almidones de fuentes no convencionales como las leguminosas puede derivar en la generación de ingredientes de alto valor para la industria cárnica. La incorporación de almidones de alta funcionalidad puede mejorar el desempeño de formulaciones y la obtención de productos cárnicos como jamones y chorizos de excelente calidad aprovechando materias primas con diferentes características de calidad. Así, el almidón de leguminosa modificado mediante un solo paso con extrusión reactiva y sin efluentes al medio ambiente, resulta prometedor para la elaboración de productos que presenten desviaciones de calidad. En esta investigación se propone el uso de almidón modificado de leguminosa como alternativa para contrarrestar los defectos de calidad de la carne que son muy comunes en la carne de cerdo, como es la carne PSE.

II. ANTECEDENTES

II.1 Consumo de productos cárnicos en México

La carne y los productos cárnicos forman parte importante de la dieta gracias al alto contenido de proteínas con alto valor biológico y digestibilidad. También son una fuente de compuestos que tienen importantes funciones fisiológicas en el cuerpo humano, como la creatina que es una fuente de energía para los músculos, y la taurina y beta-alanina que tienen acción antioxidante (Campagnol y col., 2022).

En México, el consumo de carne ha mostrado una tendencia creciente durante las últimas décadas, impulsada por factores como el crecimiento poblacional, la urbanización, el aumento de los ingresos y la diversificación de la oferta de productos cárnicos. De acuerdo con el Consejo Mexicano de la Carne (COMECARNE), durante 2024 el consumo nacional de carne alcanzó 9.94 millones de toneladas, ubicando a México entre los principales países consumidores de proteína cárnica a nivel mundial. Dentro de este contexto, las carnes procesadas y las carnes frías han adquirido una participación importante en la alimentación de la población debido a su facilidad de preparación, versatilidad y amplia disponibilidad comercial. En 2024, la producción nacional de carnes frías alcanzó 1.183 millones de toneladas, cifra superior en 1.8 % respecto al año anterior. Asimismo, el consumo de estos productos continuó en aumento, reflejando su aceptación dentro de los hábitos alimentarios de las familias mexicanas.

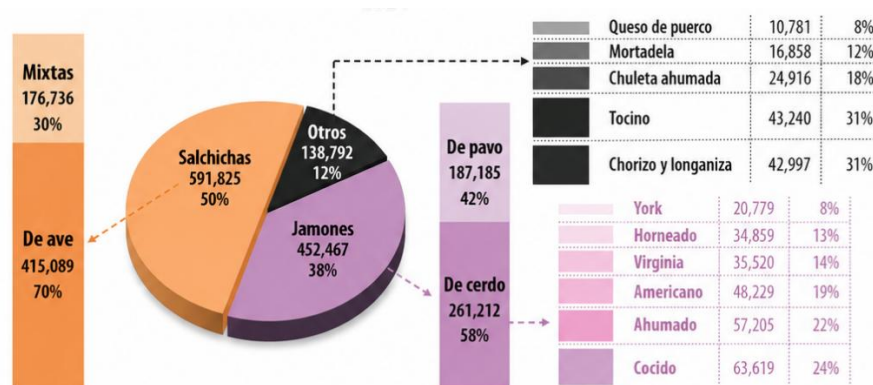


Figura 1. Volumen anual de carnes frías por cárnico 2024 (COMECARNE, 2025).

II.2 Jamón

El jamón cocido es un producto cárnico de amplio consumo, de color rosado y sabor característico. Se compone principalmente de cortes de carne de pierna de cerdo y su proceso de producción incluye la adición de aditivos e ingredientes a la salmuera, masaje, reposo y tratamiento térmico (Xargayó, 2010). La calidad del producto final depende de la calidad de la carne de cerdo cruda y de las técnicas de procesamiento utilizadas, incluida la inyección de salmuera, el volteo y la cocción a una temperatura central de 66-75 °C (Mustedanagic y col., 2023). La textura de los jamones cocidos depende de varios factores, como el grado de calentamiento (descomposición de la estructura), el contenido de humedad, el grado de proteólisis (grado de descomposición de la proteína miofibrilar) y el contenido de tejido conectivo. El contenido de grasa intramuscular también ejerce una influencia positiva en algunos rasgos de textura y apariencia. Los almidones comerciales generalmente se modifican mediante pre gelatinización para que se hinchen en agua fría y se reticulen para impartir estabilidad para el procesamiento del jamón cocido, aumentando la capacidad de retención de agua. Mejorarán la textura y unirán el agua, así como también mejorarán la sensación en boca del producto cocido (Toldrá y col., 2010).

II.2.1 Clasificación comercial del jamón

Existe una amplia gama de tipos de jamón cocido, que generalmente se clasifican en función de diferentes características. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana: “Jamón-Denominación y clasificación comercial, especificaciones fisicoquímicas, microbiológicas, organolépticas, información comercial y métodos de prueba” (NOM-158-SCFI-2003) el jamón puede clasificarse por la especie de origen y por su aporte de proteína.

En función de su origen, el jamón puede denominarse según la proporción de carne de cerdo y pavo utilizada en su elaboración:

Cuadro 1. Denominación comercial del jamón de acuerdo con su especie de origen (NOM-158-SCFI-2003).

Denominación comercial	Definición
Jamón o Jamón de Pierna	Los elaborados exclusivamente con carne de la pierna trasera del cerdo (con o sin hueso).
Jamón de Pavo	Los elaborados exclusivamente con carne del muslo del pavo.
Jamón de Cerdo y Pavo	Los elaborados con un mínimo del 55 % de carne de cerdo y el resto con carne de pavo.
Jamón de Pavo y Cerdo	Los elaborados con un mínimo del 55 % de carne de pavo y el resto con carne de cerdo.

Por otra parte, de acuerdo con los distintos grados de calidad, el jamón se clasifica en función de su contenido de proteína, humedad, grasa y la adición de otros aditivos:

Cuadro 2. Clasificación del jamón de acuerdo con su aporte de proteína y calidad (NOM-158-SCFI-2003).

Clasificación	% PLG ¹ Mínimo	% Grasa Máximo	% Humedad Máximo	% Proteína adicionada ³ Máximo	% Carragenina ⁴ Máximo	% Fécula Máximo
Prime, Extra o Extrafino	18	6	75	0	1.5	0
Fino	16	6	76	0	1.5	0
Comercial	14	8	76	2	1.5	5
Económico	12	10	76	2	1.5	10
Popular	12	10	76	2	1.5	10

¹ Proteína cárnica libre de grasa.

² Los ligadores citados podrán emplearse mezclados, a condición de que el porcentaje total de dicha mezcla no rebase el máximo permitido para uno de ellos.

³ Proteína vegetal o proteína animal.

⁴ Permitida sólo para evitar el desuerado o sinéresis en producto terminado.

En donde se puede destacar que los jamones con la adición de proteínas o féculas

son los que se consideran los más finos y con un alto aporte proteico, sin embargo, presentan un alto costo y por ende no son los más consumidos por la población. Por el contrario, jamones con al menos 10 % de fécula o almidón son los que se consideran como comerciales y son los de mayor demanda.

II.3 Chorizo

El chorizo es un producto cárnico hecho de carne de cerdo (70–80 %) y grasa dorsal de cerdo (15–20 %), el cual pasa por un proceso de curado donde se seca y madura durante un tiempo, durante la deshidratación se producen cambios bioquímicos y microbiológicos que desarrollan su olor y sabor característicos. Este desarrollo del sabor también se debe a la incorporación de diferentes aditivos, especias y condimentos (Martínez-Zamora y col., 2020). En general, estos productos son ricos en grasa (26 a 32 %), y no se incluye ni fibra ni almidón en la formulación. Tradicionalmente, el chorizo se embute en tripas naturales y puede recibir un proceso de maduración antes de su consumo como un producto curado fermentado.

Debido a su preparación artesanal, este producto está sujeto a una gran diversidad de recetas con variaciones significativas en los ingredientes. Estas variedades se diferencian principalmente en el tipo (natural o artificial) y el diámetro de la tripa, el tamaño y la forma de las unidades de embutido, la proporción de magro y grasa en la mezcla, el grado de picado de la carne, la identidad y cantidad de las especias añadidas, y las particularidades del proceso de producción, como las prácticas de ahumado, las condiciones ambientales y el tiempo de maduración (Rodríguez González y col., 2025). Por ello, existen diversos productos cárnicos denominados chorizo (fresco, cocido o curado), ampliamente comercializados en numerosos países, especialmente España, Portugal y Latinoamérica (Salazar y col., 2021). A diferencia de los chorizos de España, en el chorizo de cerdo mexicano no se utilizan cultivos iniciadores para acidificar el producto que controla el crecimiento de patógenos; en su lugar, se agrega aproximadamente un 5 % de vinagre para reducir el pH del producto a 5.3 aproximadamente (Rodríguez González y col., 2025).

II.4 Materia prima para la elaboración de productos cárnicos

El cerdo es uno de los animales más eficientes en la producción de carne, gracias a sus características particulares, como prolificidad, corto ciclo reproductivo y gran capacidad transformadora de nutrientes, lo hacen especialmente atractivo como fuente de producción de carne para la alimentación. La carne de cerdo es la principal materia prima en productos cárnicos como el jamón y chorizo, es una fuente de proteínas de alto valor biológico, aporta los minerales y vitaminas necesarios a nuestro organismo, con una composición de ácidos grasos equilibrada y un contenido calórico moderado, al mismo tiempo también es un alimento de fácil digestión (Eusee, 2008).

II.5 Componentes de la carne

II.5.1 Agua

La carne roja magra se compone, en su mayor parte, de un 76 % de agua, un contenido que disminuye a medida que aumenta la cantidad de grasa, acercándose a los niveles de agua presentes en el tejido adiposo, que ronda el 10 %. Esta cantidad de agua tiene un impacto significativo en los cambios que experimenta la carne durante la refrigeración, el almacenamiento y el procesamiento. La relación entre la proteína y el agua se mantiene casi constante en un amplio rango de contenido graso. El tejido adiposo, por su parte, contiene poca agua; son las proteínas las que absorben la mayor parte de ella. Por lo tanto, las interacciones entre el agua y las proteínas, así como entre las propias proteínas, son cruciales, ya que determinan el tamaño de los espacios en el retículo proteico donde se retienen las moléculas de agua (Hamm, 1960).

II.5.2 Proteínas

La proteína es el componente más relevante de la carne, y en términos de cantidad, se sitúa como el segundo elemento más abundante después del agua. Según su origen, las proteínas musculares se clasifican en sarcoplásmicas, miofibrilares y del tejido conectivo (Wismer-Pedersen, 1986). Estas proteínas desempeñan un papel

crucial en la retención de agua dentro del tejido muscular. En el músculo vivo, las proteínas otorgan una estructura de gel al tejido, donde cada molécula de agua actúa como un pequeño dipolo que interactúa de manera no covalente con un gran número de moléculas cargadas. Entre estas interacciones, los puentes de hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas son las más significativas (Wismer-Pedersen, 1986).

II.5.3 Grasa

El tejido adiposo está constituido principalmente por lípidos, los cuales representan aproximadamente entre el 70 y el 90 % de su composición, además de agua, tejido conectivo y pequeñas cantidades de proteínas y minerales. La grasa constituye la principal reserva energética del organismo animal debido a su elevado valor calórico y, después del agua, es uno de los componentes más abundantes de la canal. El contenido de lípidos en el músculo presenta una amplia variación, generalmente entre 1,5 y 13 %, dependiendo de factores como la especie, raza, alimentación y sistema de producción (Burnett y col., 2020).

En la carne, el tejido adiposo se distribuye como grasa subcutánea, intermuscular e intramuscular. La grasa subcutánea se localiza debajo de la piel, mientras que la grasa intermuscular se encuentra entre los músculos. Por su parte, la grasa intramuscular corresponde al tejido adiposo localizado dentro del músculo, principalmente entre los haces y fibras musculares, constituyendo el denominado marmoleo o veteado de la carne. Además, existe una pequeña fracción de lípidos intracelulares presentes en las fibras musculares, asociados a estructuras celulares como las membranas plasmáticas y los orgánulos intracelulares. Estos lípidos estructurales están compuestos principalmente por fosfolípidos, mientras que la grasa de depósito está formada mayoritariamente por triglicéridos (Li y col., 2020).

Desde el punto de vista químico, los lípidos del tejido adiposo están constituidos principalmente por triglicéridos, que representan entre el 95 y el 99 % de los lípidos totales. El resto corresponde a fosfolípidos, colesterol y otros compuestos presentes en menores proporciones. La composición y distribución de estos lípidos influyen significativamente en las características sensoriales, tecnológicas y nutricionales de

la carne (Burnett y col., 2020).

II.5.4 Carbohidratos

Los carbohidratos, que se encuentran en todas las carnes en cantidades muy reducidas, son compuestos que se hallan en mayor proporción en los productos de origen vegetal. En el caso de la carne de cerdo, su contenido de carbohidratos es aproximadamente del 1 %, y se presenta principalmente en forma de glicolípidos (Muyulema, 2012).

II.5.5 Minerales

Los minerales constituyen aproximadamente el 1 % de la carne de cerdo, destacando entre ellos el hierro, el manganeso y el fósforo. Estos minerales son fundamentales para el organismo humano, ya que juegan un papel crucial en la formación de huesos y dientes, además de participar en procesos metabólicos importantes en diversas funciones celulares (Muyulema, 2012).

II.5.6 Vitaminas

La carne de cerdo se destaca por su alto contenido de vitaminas del complejo B, especialmente la B1, que se encuentra en mayor cantidad que en otras carnes. También es una fuente rica de vitaminas B6, B12 y riboflavina. Gracias a su elevado contenido de vitamina B1, se recomienda su consumo durante la lactancia y en períodos de convalecencia, momentos en los que el organismo requiere mayores niveles de esta vitamina (Muyulema, 2012). Las cantidades de las distintas vitaminas presentes en un trozo de carne varían en función de la especie (y, en cierta medida, de la raza), la edad del animal, el grado de engrasamiento, la dieta que ha recibido y la ubicación del corte en la canal. El engrasamiento es un factor determinante, dado que las vitaminas del grupo B son solubles en agua y se concentran principalmente en las partes magras de la carne. Además, esta carne contiene cantidades muy reducidas de vitaminas liposolubles (A, D, E y K) y de ácido ascórbico (Muyulema, 2012).

II.6 Características tecnológicas de la carne

Hay aspectos fundamentales relacionados con las características tecnológicas de la carne, como el color y el pH, que deben ser considerados. El color típico de la carne de cerdo oscila entre el rojo y el rosado. Aunque la uniformidad del color es visible a nivel de músculos individuales, al observar los músculos en su conjunto, es común que se aprecien variaciones significativas. Estas diferencias pueden no ser del agrado de los consumidores, especialmente si se presentan tonos que resultan demasiado pálidos u oscuros. Un color más intenso puede ser indicativo de un aumento en la oximioglobina (pigmento que otorga color), lo cual puede deberse a la avanzada edad del animal o a un mayor nivel de actividad fisiológica en músculos específicos, como los flexores o extensores. Adicionalmente, factores como la interacción con el oxígeno en la superficie, la contaminación bacteriana, la deshidratación superficial y la escasa acumulación de ácido láctico tras el sacrificio también pueden influir en el color de la carne. Según Mira (2009), el color es un factor crucial para determinar la calidad de los productos alimenticios y, en consecuencia, su valor comercial.

En este contexto, el pH se define como una medida que refleja el nivel de acidez o alcalinidad de una solución, determinado por la concentración de iones de hidrógeno presentes. Esta escala numérica oscila entre 0 y 14, y el pH de la carne es fundamental en este proceso, ya que influye en características esenciales como el color, la jugosidad, la textura e incluso el aroma del producto final, lo que a su vez afecta su comercialización. En el caso de la carne de cerdo, un pH inferior a 5.4 puede dar lugar a un producto pálido, blando y exudativo, mientras que un pH superior a 5.6 puede resultar en carne oscura, dura y seca (Muyulema, 2012).

El pH es un factor clave en la calidad de la carne durante el proceso de sacrificio. Un pH alto (más alcalino) puede producir una textura pastosa y un color oscuro poco atractivo; por otro lado, un pH bajo (más ácido) puede hacer que la carne sea más tierna, pero con un sabor metálico desagradable.

Durante el sacrificio, la falta de oxígeno desencadena la glicólisis anaerobia, lo que

lleva a la producción de ácido láctico a partir del glucógeno. Esta acumulación de ácido láctico provoca una disminución significativa del pH en los músculos. Un pH bajo promueve la formación de enlaces entre proteínas musculares, como la actina y la miosina, generando así la rigidez cadavérica. Cuando el pH no se encuentra en el rango adecuado, pueden surgir defectos que comprometen la calidad de la carne (Muyulema, 2012).

II.6.1 Defectos en la carne

La carne de cerdo tiene características físicas y tecnológicas que nos pueden indicar su calidad. Cuando se determinan algunas propiedades fisicoquímicas se puede clasificar en carne normal, carne con defecto PSE (“pale, soft, exudative”, por sus siglas en inglés) y con defecto DFD (“dark, firm, dry”, por sus siglas en inglés).

II.6.1.1 Carne PSE.

La carne PSE es un defecto característico de la carne de cerdo que se presenta con frecuencia en aquellos cerdos que poseen una alta sensibilidad genética al estrés intenso y repentino, ya sea justo antes del sacrificio o en el momento en que este se lleva a cabo. En estas condiciones, el estrés pronunciado previo al sacrificio, junto con los efectos del aturdimiento, acelera el metabolismo muscular, el cual continúa después de la muerte del animal y conduce a una rápida caída del pH mientras la temperatura muscular aún es alta. Durante el estrés, el metabolismo se acelera de forma notable, generando una actividad glucolítica continua gracias a la adecuada disponibilidad de glucógeno. Como resultado, el pH desciende por debajo de 5,8 entre los 30 y 45 minutos posteriores a la muerte, especialmente en condiciones de alta temperatura muscular (superior a 35 °C) (Honikel y col., 1986).

La combinación de pH bajo y alta temperatura provoca la desnaturalización de las proteínas sarcoplásmicas y miofibrilares, siendo la miosina la más sensible. Esta desnaturalización reduce la capacidad de retención de agua, ya que la red de miofilamentos se retrae y expulsa agua al espacio extracelular, aumentando la capacidad de la carne para reflejar la luz (Boland y col., 2019).

En los cerdos susceptibles al PSE, la velocidad de liberación de Ca^{2+} del retículo sarcoplásmico es aproximadamente el doble que en animales sanos. Ante un estímulo neuromuscular provocado por el estrés, la concentración de Ca^{2+} se eleva considerablemente, superando así lo necesario para iniciar un ciclo de contracción y rebasando la capacidad de la bomba de calcio para devolver este ion a los niveles de reposo. Este repentino incremento de Ca^{2+} en el sarcoplasma acelera la velocidad de recambio de ATP y la glucólisis en el músculo, lo que provoca un descenso más rápido del pH, característico de los músculos PSE.

Además, el rigor mortis se establece en un tiempo más breve, dado que las reservas energéticas se metabolizan rápidamente. En músculos normales, los cambios post mortem culminan en un pH de entre 5.6 y 5.4 aproximadamente entre 5 y 9 horas después del sacrificio, mientras que la temperatura muscular desciende según las condiciones de refrigeración. Por ejemplo, en una canal refrigerada de manera convencional, el pH del músculo *longissimus dorsi* desciende entre 6.3 y 5.9 a las 3 horas post mortem (Honikel y col., 1986).

La carne PSE se caracteriza por una notable exudación en su superficie de corte, la cual resulta muy húmeda y pierde líquido con solo aplicar una ligera presión. Según Offer y Trinick (1983), la desnaturalización de la miosina puede provocar una pérdida de cargas eléctricas en los filamentos o modificar la estructura de los puentes cruzados entre actina y miosina, lo que lleva a un encogimiento del retículo que forma los filamentos, produciendo así pérdidas de agua.

Asimismo, presenta un color más pálido y menos rosado en comparación con la carne normal, debido al aumento en la dispersión de la luz causado por la desnaturalización de proteínas sarcoplásmicas. Cuando la luz incide sobre la superficie de la carne, una parte se refleja sin alterar su longitud de onda, mientras que otra penetra en el tejido y se dispersa significativamente, perdiendo su dirección original. Una fracción de esta luz dispersada hace un recorrido en forma de U, dispersándose en varios puntos antes de regresar al punto de origen. Parte de la luz que regresa logra escapar de la superficie de la carne, volviéndose visible para el

observador, lo que contribuye a que esta aparezca más pálida; cuanto más luz regresa, más pálida parece la carne. Adicionalmente, algunas longitudes de onda son absorbidas al atravesar la carne (por ejemplo, la mioglobina absorbe gran parte de la luz verde), lo que comúnmente le otorga a la carne de cerdo un tono rosado. En el caso de la carne PSE, el incremento en la dispersión reduce el paso de luz a través del tejido, disminuyendo la absorción selectiva y resultando en un color más pálido y menos rosado que el de la carne convencional.

La desnaturalización de la mioglobina puede tener un efecto notable, ya que su transformación en metamioglobina disminuye la intensidad del característico color rosado de la carne de cerdo. La flaccidez de la carne PSE parece ser resultado del colapso del retículo de los miofilamentos y la expansión de los fluidos sarcoplásmico e intracelular, lo que reduce la firmeza y turgencia de la carne. Esto es similar a cómo la condición osmótica de las células vegetales influye en la turgencia o blandura de las frutas (Swatland, 1992). Como resultado, la aceptación de esta carne es menor debido a su apariencia y a las pérdidas durante la cocción. Desde una perspectiva tecnológica, su baja capacidad de retención de agua la hace inadecuada para la elaboración de jamones cocidos, piezas curadas y productos cárnicos tipo emulsión.

II.7 Uso de almidones en la elaboración de productos cárnicos

Los ingredientes no cárnicos desempeñan un papel fundamental en la elaboración de productos cárnicos emulsionados, como el jamón, debido a sus propiedades funcionales, entre las que destacan la capacidad de emulsificación, así como la mejora de la textura y la apariencia del producto final. La incorporación de almidón en matrices cárnicas tipo emulsión-gel favorece significativamente a la retención de agua y a la estabilización de los lípidos, propiedades especialmente relevantes en productos como el chorizo, donde se requiere una masa uniforme y cohesiva (Salazar y col., 2021).

Durante la elaboración de jamones, la correcta unión de las piezas de carne es importante, así como, la retención de la salmuera añadida, ya que estos parámetros ayudan a definir el rendimiento y la estructura del producto. La unión óptima se puede

lograr a través del procesamiento mecánico y térmico más la adición de ingredientes funcionales, que mejoran la funcionalidad de las proteínas de la carne (es decir, sal y fosfatos) o tienen un efecto funcional directo en el sistema de la carne, como los almidones (Resconi y col., 2016).

El almidón es uno de los componentes alimentarios formadores de estructura más importantes debido a sus propiedades fisicoquímicas. Este polisacárido es un ejemplo de posible sustituto de los fosfatos, que pueden permitir el logro de niveles similares de retención de agua y potencialmente mejorar aún más la textura y el sabor de los productos cárnicos. Sin embargo, la magnitud de estos efectos difiere según varios factores, como el origen botánico del almidón, el procesamiento químico/físico y la concentración, la matriz en la que actúa, el proceso tecnológico, las temperaturas de cocción y la concentración de sal (Rezler, 2022). El uso de almidón en la formulación implica la textura final y la sensación en boca como atributos clave de calidad, obteniendo una composición estándar en relación con el nivel de agua y el contenido de grasa como resultado de la funcionalidad del almidón, reflejada en el rendimiento esperado mejorando las condiciones de vida útil durante el almacenamiento (Varga, 2017).

II.7.1 Fuentes de almidón no convencionales

La composición y las propiedades fisicoquímicas del almidón varían significativamente dependiendo de su fuente botánica, presentando típicamente una proporción promedio de amilosa entre 20 y 30 % y amilopectina entre 70 y 80 %. La estructura granular del almidón comprende regiones tanto cristalinas como amorfas, influenciadas por la presencia de cadenas de amilopectina altamente ramificadas. La relación amilosa-amilopectina es un factor crítico que afecta varias propiedades del almidón, incluyendo el comportamiento de gelatinización, estabilidad térmica, retrogradación, capacidad de absorción de agua y estabilidad en condiciones de congelación-descongelación (Carvalho y col., 2024). Las fuentes no convencionales de almidón incluyen frutas (mango verde, plátano verde, manzanas), rizomas (jengibre, cúrcuma), cereales (como el mijo) y pseudocereales (como el amaranto y

el trigo sarraceno) y legumbres (frijol, haba, lenteja) (Makroo y col., 2021). El contenido relativamente alto de amilosa les da a los almidones de legumbres propiedades térmicas características como capacidad de hinchamiento restringida, alta temperatura de gelificación, agregación más prominente y alta viscosidad final de sus geles (Nilsson y col., 2022).

Las habas contienen entre un 45 y un 55 % de carbohidratos en peso seco, siendo el almidón su componente principal, representando entre un 35 y un 45 % de su peso seco. Además, el almidón de haba incluye pequeñas cantidades de nitrógeno, minerales y lípidos, según Punia y colaboradores (2019). Este almidón se caracteriza por tener una temperatura de gelatinización más alta en comparación con el almidón de trigo o de papa, y presenta una solubilidad y un poder de hinchamiento a 95 °C que superan los del almidón de trigo o maíz. Finalmente, las habas son leguminosas con alto contenido de almidón resistente que podría considerarse fibra y ayudar a la mejora intestinal por su efecto prebiótico (Gorbach y col., 2017). Las semillas de lenteja contienen aproximadamente entre un 67 y un 69 % de carbohidratos (de los cuales el 44 % proviene de la presencia de almidón) y entre un 24 y un 30 % de proteínas (Ren y col., 2023). El almidón de lenteja presenta cadenas de ramificación de amilopectina más largas con concentraciones de amilosa más altas (38,0 %–41,1 %) en comparación con los almidones comúnmente utilizados en aplicaciones comerciales, incluido el maíz ceroso, el maíz regular y la tapioca (Nahar y col., 2024).

A diferencia de los almidones provenientes de cereales, los almidones de legumbres tienden a tener un IG (índice glucémico) más bajo, lo que puede ser beneficioso para moderar la respuesta a la insulina y regular el metabolismo de la glucosa. El mayor contenido de amilosa, el contenido de almidón resistente y la ausencia de poros en las superficies granulares de los almidones de legumbres se asocian con tasas de digestión más lentas, mejorando así los efectos de saciedad de los alimentos (Nilsson y col., 2022).

II.7.2 Modificaciones de los almidones

Los almidones pueden ser modificados mediante métodos químicos, físicos y/o

enzimáticos, con el fin de mejorar sus propiedades, como la capacidad de hinchamiento, la viscosidad, la solubilidad y la temperatura de gelatinización (Li y col., 2019). En comparación con las modificaciones físicas o enzimáticas, las técnicas químicas permiten un espectro mucho más amplio para la funcionalización del almidón y amplían el campo de aplicaciones. Las modificaciones químicas no son destructivas y los grupos hidroxilo de los almidones sirven como sitios activos para la introducción de grupos funcionales como, por ejemplo, grupos acetilo, carboxilo y etilo que actúan como reactivos electrofílicos. Sin embargo, la velocidad y la eficiencia de la modificación dependen de varios factores como la fuente de almidón, la relación amilosa- amilopectina, la morfología del gránulo, las condiciones de reacción y la naturaleza y cantidad del reactivo modificador (Compart y col., 2023). Las modificaciones químicas abarcan procesos tales como la conversión, sustitución y formación de enlaces cruzados. Este tipo de almidones se utiliza en la estabilización de emulsiones y en la encapsulación. Entre las modificaciones químicas más comunes se encuentra la succinatación, que permite obtener almidón octenilsuccinato (almidón OSA).

El anhídrido octenil succínico (OSA) es un agente de esterificación comúnmente utilizado para modificar almidones. La modificación de OSA incorpora grupos hidrófobos en las moléculas de almidón, y el derivado es anfifílico, lo que puede actuar como estabilizador de emulsión (Zhang y col., 2021). Los almidones OSA pueden retener y encapsular microorganismos, pigmentos, proteínas, sabores, lípidos entre otros compuestos (Hoyos-Leyva y col., 2016). Además, tienen grandes ventajas ya que presentan alta capacidad emulsionante y espesante (Ovando-Martinez y col., 2017; Simsek y col., 2015), buena tolerancia a condiciones ambientales adversas a través de la estabilización estérica, y puede proteger ingredientes naturales contra la oxidación y el proceso de digestión.

II.7.3 Almidones Succinatados

El almidón octenil succínico es un emulsionante reconocido entre los emulsionantes macromoleculares biológicos, que tiene características de ser un aditivo y excipiente

alimentario incoloro, inodoro, económico, no alergénico y aprobado por la Food and Drug Administration (FDA, por sus siglas en inglés) la cual permite la adición de un máximo de 3 % de almidón OSA para aplicaciones alimentarias (grado de sustitución 0.02) (Zhou y col, 2023; Ovando-Martinez y col., 2017). Los grupos hidroxilo en las posiciones C-2, C-3 y C-6 de las unidades de glucosa de la molécula de almidón se pueden reemplazar por los grupos octenil succínicos (OS) en condiciones alcalinas para una reacción de esterificación. Los grupos OS hidrófobos se unen a la estructura molecular del almidón para convertir el almidón nativo en partículas anfifílicas hidrófilas e hidrófobas. La naturaleza bifuncional de este almidón contribuye a su actividad superficial y permite una variedad de aplicaciones, como encapsular sabores, aglutinantes, agentes espesantes o estabilizadores de emulsiones (Zhou y col., 2023).

Los almidones modificados con anhídrido octenil succínico (OSA) pueden tener una amplia gama de configuraciones moleculares y, como resultado, se logra una combinación única de propiedades. Al alterar las condiciones de reacción con OSA y las características estructurales del almidón OSA, como la distribución del tamaño molecular, la distribución de la longitud de la cadena, el grado de ramificación y el grado de sustitución, se pueden alterar la viscosidad, la solubilidad y las cualidades del producto (Gautam y col., 2023).

II.7.4 Extrusión reactiva para almidón OSA

La modificación del almidón se ha llevado a cabo tradicionalmente en reactores de tanque con varios reactivos y un largo tiempo de procesamiento, lo que genera impactos negativos en la generación de efluentes; por lo tanto, el uso de métodos físicos puede ser un enfoque interesante para minimizar el uso excesivo de reactivos. Alternativamente, el proceso de extrusión reactiva es un método eficiente y versátil para modificar el almidón y se considera una solución tecnológica verde ya que el extrusor se utiliza como reactor, donde se pueden realizar reacciones químicas como esterificación, hidroxipropilación y reticulación (Marim y col., 2022). Las principales ventajas de este método son su simplicidad, alta velocidad, uso de un proceso

continuo, costo relativamente bajo y generación limitada de aguas residuales y gases (Ye y col., 2019). Debido a que el procesamiento de extrusión implica condiciones de alta fuerza (cizalla) y presión, la gelatinización se logra a baja concentración de humedad, ya que las fuerzas de cizalla rompen físicamente los gránulos de almidón, permitiendo una transferencia más rápida de agua a las moléculas. Por lo tanto, durante la extrusión, la pérdida de cristalinidad no es causada por la penetración del agua, sino por la interrupción mecánica de los enlaces moleculares debido a los intensos campos de cizallamiento dentro del extrusor. De hecho, durante la extrusión a baja humedad, pequeñas cantidades de almidón gelatinizado y fundido, así como la fragmentación del almidón (degradación o descomposición), existen simultáneamente (Liu y col., 2009).

La extrusión se puede utilizar para producir almidones modificados en un proceso de reacción continuó con una calidad de producto más consistente. Las variaciones en el diseño del tornillo ofrecen la capacidad de controlar los tiempos de residencia, así como también brindan oportunidades para agregar reactivos y aditivos como coadyuvantes de procesamiento y estabilizadores durante el proceso (Ye y col., 2019). Bajo las condiciones de extrusión, los gránulos de almidón son hidrolizados (dextrinización) conforme pasan a través del extrusor por la temperatura y acción mecánica y al mismo tiempo se llevan a cabo las reacciones de esterificación. El almidón resistente ha demostrado tener una importante estabilidad a temperaturas elevadas (>90 °C) (Martínez y col., 2015). La extrusión reactiva de un paso se ha utilizado en almidón de maíz para la esterificación mediante anhídrido octenil succínico (Tian y col., 2015), almidón de arroz esterificado con ácido cítrico (Ye y col., 2019) y almidón de arroz esterificado con anhídrido octenil succínico (Cai y col., 2019).

III. OBJETIVOS

III.1 Objetivo general

Evaluar el uso de almidón de haba y lenteja modificado por extrusión reactiva en la elaboración de jamón y chorizo con carne de diferente capacidad de retención de agua como materia prima, así como, los posibles efectos en la estabilidad del producto.

III.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente el almidón de haba y lenteja modificado por extrusión reactiva.
- Desarrollar dos productos cárnicos (jamón y chorizo de cerdo) a partir de carne de diferente capacidad de retención de agua (PSE y normal) con la adición de almidón modificado.
- Evaluar la vida de anaquel de los productos cárnicos elaborados con la adición de almidón modificado.

IV. METODOLOGÍA

IV.1 Extracción del almidón de leguminosa

Los granos de haba y lenteja fueron procesados en un molino granulador equipado con un sistema de cuchillas y una malla integrada (Pulvex) para producir harina. La extracción del almidón se llevó a cabo siguiendo el método de Li y colaboradores (2019), con algunas modificaciones en el procedimiento. Para comenzar, aproximadamente 300 g de harina se suspendieron en 750 mL de agua destilada y se agitaron durante una hora. Posteriormente, el sobrenadante se separó mediante decantación, y la capa de proteína que se encontró sobre el precipitado fue retirada con una espátula. Este proceso se repitió dos veces más. El sedimento resultante se resuspendió en 600 mL de agua destilada y se le añadió una solución de NaOH al 0.5 M. Luego, se sometió a una agitación de una hora para disolver las proteínas restantes, y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 12 horas. Después de este tiempo, se procedió a una molienda húmeda utilizando un molino de piedras (FUMASA). La suspensión obtenida se tamizó a través de mallas de 30, 100 y 200 (según el estándar U. S.). Las fracciones retenidas en cada malla se lavaron con agua para recuperar la mayor cantidad de almidón posible. El almidón se mantuvo en reposo a 5 °C durante toda la noche con bisulfito de sodio al 0.2 %. Al día siguiente, se eliminó el sobrenadante y el residuo (almidón nativo) se secó en un horno de convección a 40 °C durante 24 horas. Finalmente, el almidón seco se molió y se pasó por una malla de 100 µm.

IV.1.1 Caracterización del almidón nativo de leguminosa

IV.1.1.1 Perfil de viscosidad

El análisis del perfil de viscosidad se llevó a cabo mediante un Rapid Visco Analyzer (RVA), modelo Super 4, fabricado por Newport Scientific PTY Ltd. en Sydney, Australia. Para ello, se pesaron 2 g de muestra en base seca (BS), que se mezclaron con 28 mL de agua destilada. Las mediciones se realizaron de acuerdo con las especificaciones del método AACC 61-02 (1999). El procedimiento comenzó con una

temperatura inicial de 50 °C, que se mantuvo durante 1 minuto. Luego, la temperatura aumento hasta alcanzar los 92 °C a una tasa de calentamiento de 5. 5 °C/min. Una vez que se logró esta temperatura, se sostuvo durante 5 minutos. Posteriormente, se procedió al enfriamiento a la misma velocidad hasta regresar a los 50 °C, temperatura que se mantuvo durante 2 minutos. El análisis completo tuvo una duración total de 23 minutos, y los resultados obtenidos se reportaron en centipoises (cP) como unidades de viscosidad.

IV.1.1.2 Microscopía electrónica de barrido

La estructura de los gránulos de almidón se analizó a través de microscopía electrónica de barrido con emisión de campo (FE-SEM, modelo S-4700 de Hitachi, Japón). Para llevar a cabo este análisis, se colocó una gota de la suspensión sobre una oblea de silicio, dejando que se seque en un desecador. Posteriormente, la muestra se fijó con cinta adhesiva de grafito de doble cara y se recubrió con una fina capa de oro mediante pulverización catódica durante 60 segundos, antes de proceder a su observación a distintos niveles de aumento.

IV.1.1.3 Espectroscopía infrarroja

Los espectros de infrarrojo se obtuvieron mediante espectroscopía FTIR utilizando un espectrómetro Spectrum GX (PerkinElmer, MA, EE. UU.), equipado con un accesorio de reflectancia difusa de Pike Technologies. Las muestras se prepararon mediante molienda fina y dilución en KBr en una proporción 1:100 (p/p). Los espectros se registraron en un intervalo de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} .

IV.2 Extrusión reactiva del almidón de leguminosa

El almidón se ajustó a un contenido de humedad de 25 % y se agregó 3 % de reactivo anhídrido octenil succínico (OSA, base de almidón seco) y 1 % de NaOH (base de almidón seco), la metodología se realizó conforme a lo señalado por Tian y col., (2015). El almidón control se preparó sin reactivo OSA. Las muestras de almidón se trataron en una extrusora de un solo tornillo. Las condiciones del extrusor se seleccionaron para asegurar muestras extruidas gelatinizadas. Las temperaturas del

barril se mantuvieron constantes a 60, 130 y 150 °C en las zonas de alimentación, transición y extrusión a alta presión, respectivamente. La relación de compresión del tornillo será de 3:1 y se usó una boquilla de 4.0 mm de diámetro. La velocidad del tornillo se conservó constante a 80 rpm y la velocidad de alimentación fue de 70 g/min. Las muestras extrudidas se secaron a 40 °C durante 24 h y se trataron en un molino granulador (Pulvex) para obtener el almidón succinatado de leguminosa. La extrusión se realizó por triplicado para cada tipo de almidón.

IV.2.1 Caracterización del almidón modificado

IV.2.1.1 Perfil de viscosidad

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la sección IV.1.1.1

IV.2.1.2 Microscopía electrónica de barrido

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo establecido en la sección IV.1.1.2

IV.2.1.3 Espectroscopía infrarroja

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo establecido en la sección IV.1.1.3

IV.3 Elaboración de los productos cárnicos

Como materia prima principal para la elaboración de jamón y chorizo se utilizó carne (músculo *L. dorsi*), producida y donada por el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), que fue clasificada en: carne con defecto PSE y otra carne con calidad normal. En el momento de su recepción fue clasificada acorde a su pH, medido por punción con un equipo portátil HI 99163 (HANNA Instruments Inc.), capacidad de retención de agua por centrifugación y color (L^* , a^* y b^* , escala CIE-Lab, espectro colorímetro MiniScan HunterLab). La formulación del jamón de cerdo se muestra en el Cuadro 3. Se planteó un diseño factorial 2^3 completamente al azar, donde los factores fueron el tipo de carne: normal y PSE; el tipo de almidón modificado: de haba y lenteja; y la concentración: 0 y 5 % de adición del almidón modificado. La unidad experimental fueron el jamón y chorizo

de las cuales se realizaron 3 réplicas de cada tratamiento.

IV.3.1 Formulación y elaboración de jamón de cerdo

Se realizó el acondicionamiento de la carne, a través de la eliminación de exceso de grasa, tendones, ligamentos y coágulos de sangre, seguidamente se obtuvieron trozos de aproximadamente 15 cm x 5 cm x 5 cm, que se pasaron por el tornillo del molino de carne con el objetivo de romper las fibras musculares. Los fosfatos se disolvieron en un tercio del volumen total de agua, con ayuda de una licuadora y adicionando un poco de hielo para impedir el aumento de temperatura, una vez disuelto se adiciono el resto de los componentes y agua. La carne previamente acondicionada se mezcló, junto con la solución de salmuera, a baja velocidad durante 20 minutos, hasta obtener una distribución adecuada. La mezcla se colocó en refrigeración 24 h (4 °C). Una vez completado el tiempo de curado, se procedió a embutir la mezcla en una funda para jamón, previniendo que no quedaran huecos o burbujas de aire en la masa cárnica. Se colocó en la forja (molde metálico) el producto obtenido. Se cocinó la masa cárnica en agua a 80 °C hasta que la temperatura en el centro del producto alcance los 68 °C, verificándolo con un termómetro de punción. Una vez finalizada la cocción, se extrajo el producto del agua y se enfrió en un baño de agua con hielo durante 5 minutos. Posteriormente, se refrigeró a una temperatura de 4 a 10 °C. Tras el enfriamiento, se desmoldo y se retiró la funda.

Cuadro 3. Formulación base para la elaboración de jamón cocido

Ingrediente	Cantidad
Carne de cerdo	58.00 %
Agua	37.90 %
Cloruro de sodio	1.20 %
Azúcar	0.30 %
Sal cura	1.00 %
Mezcla de fosfatos de sodio	0.80 %
Condimentos	0.80 %
Total	100.00 %

IV.3.2 Formulación y elaboración de chorizo de cerdo

El procedimiento para la elaboración de chorizo mexicano fue el siguiente y se usó una formulación base para chorizo mexicano (Cuadro 4). Se planteó un diseño factorial 2^3 completamente al azar, donde los factores fueron el tipo de carne: normal y PSE; el tipo de almidón modificado: de haba y lenteja; y la concentración: 0 y 5 % de adición del almidón modificado.

Todos los ingredientes se pesaron con ayuda de balanza analítica. La carne y el lardo se pasaron por el molino con una placa de 6 mm de abertura. La carne y grasa molida se mantuvieron a 4 °C. Posteriormente se mezclaron la carne, el lardo y los condimentos secos en una mezcladora TORREY, usándose baja velocidad durante 9 min, procurando que la temperatura se mantenga máximo a 10 °C. Finalizado el tiempo, se pasó la carne a una charola y cubrió con plástico para emplear, se dejó reposar a 4 °C durante 24 h. Para el condimento, se molieron los chiles, junto con los dientes de ajo, hasta la obtención de una pasta, una vez molidos, se incorporaron a la carne reposada. Transcurrido el tiempo, se mezcló la pasta durante 2 – 4 min, se compacto eliminando las burbujas de aire, y se colocó en la embudidora provista de una boquilla de 2 cm de diámetro y se procedió a embutir la pasta en funda de celulosa o colágeno. Se realizaron amarres cada 10 cm, logrando la obtención de las piezas de chorizo mexicano. Se colocaron a temperatura ambiente por 3 días (NOM-213-SSA1-2018, Manual de laboratorio de tecnología de productos cárnicos UAQ).

Cuadro 4. Formulación base para la elaboración de chorizo mexicano tradicional

Ingrediente	Cantidad
Carne de cerdo	65.00 %
Lardo de cerdo	20.00 %
Cloruro de sodio	0.79 %
Sal cura	0.33 %
Condimentos	4.00 %
Chile guajillo	2.98 %
Ajo	0.90 %
Vinagre	6.00 %
Total	100.00 %

IV.4 Determinaciones para jamón de cerdo

IV.4.1 Color, pH y temperatura

Los parámetros de luminosidad (L^*), índice rojo-verde (a^*) e índice amarillo-azul (b^*) se determinaron con un espectro colorímetro MiniScan HunterLab (con Iluminante D65 a 10° del observador) (AMSA, 2012). El pH y temperatura se midió usando un potenciómetro HI 99163 (HANNA Instruments Inc.). El medidor de pH se calibró a dos puntos, 4 y 7.

IV.4.2 Textura

Las muestras fueron cortadas en segmentos de 2 cm para llevar a cabo el análisis de perfil de textura utilizando un texturómetro (Texture Analyser, TA. XT-Plus). Este proceso consistió en ejercer una compresión axial en dos ciclos consecutivos mediante una sonda acrílica de 25 mm de diámetro, manteniendo una velocidad de 1 mm/s, una compresión del 50 % y un tiempo de espera de 5 segundos (Barragán y col., 2019). Los parámetros de textura se calcularon a partir de las curvas de fuerza-tiempo, que permitió determinar la cohesión, dureza, elasticidad, gomosidad y masticabilidad (Szczeniak, 1963; Bourne, 1978). La elasticidad se evaluó midiendo el área encerrada en las curvas de fuerza-deformación (Voisey y col., 1975). Los resultados representan la media de tres ejecuciones reproducibles de cada lote de jamón elaborado (Barragán y col., 2019).

IV.4.3 Oxidación lipídica

Para evaluar la oxidación lipídica, se pesaron 5 g de la muestra, la cual se homogenizó en un baño de hielo utilizando un homogeneizador IKA T25 Ultra Turrax (Alemania). Se mezclaron 5 g de muestra con 20 mL de una solución de ácido tricloroacético (TCA) al 5 % (w/v) durante 1 minuto. A continuación, el homogenizado se centrifugó a 10,000 rpm y 4 °C durante 20 minutos. El sobrenadante resultante se filtró utilizando papel filtro Whatman No. 1, recolectando el filtrado en tubos que están protegidos de la luz y que se almacenarán a -20 °C para análisis posteriores. La determinación de las especies reactivas al ácido 2-tiobarbitúrico (TBARS) se realizó tomando 1 mL del extracto al que se le añadirá 1 mL de ácido tiobarbitúrico (TBA) a 80 mM. Esta mezcla se agitó y luego se sometió a un tratamiento térmico a 95 °C durante 30 minutos, seguido de un enfriamiento en un baño de hielo. Finalmente, la

absorbancia se midió a 530 nm (Raharjo y col., 1993). Los resultados se expresaron en mg de malondialdehído (mg MDA) por kg de muestra, calculado a partir de una curva de calibración utilizando malondialdehído como estándar.

IV.4.4 Oxidación proteica

El contenido de proteína se determinó mediante el método del ácido bicinónico (BCA), utilizando un kit comercial (BCA1, Sigma-Aldrich). El reactivo de trabajo (50:1, reactivo A: reactivo B) se mezcló con las muestras (8:1, reactivo: muestra), se incubó a 37 °C durante 30 min y la absorbancia se midió a 562 nm. La concentración de proteína se calculó a partir de una curva estándar de albúmina sérica bovina (BSA).

La oxidación proteica se evaluó mediante la determinación de grupos carbonilo por derivatización con 2,4-dinitrofenilhidrazina (DNPH). Se mezclaron 100 µL de muestra proteica (10 mg/mL) con 100 µL de DNPH, se incubó 10 min a temperatura ambiente y 40 min a 25 °C. Posteriormente, se añadieron 30 µL de ácido tricloroacético (TCA) al 87%, se incubó en hielo durante 5 min y se centrifugó a 13,000 × g durante 2 min a 4 °C. El precipitado se lavó con 500 µL de acetona fría, se sonicó 30 s, se incubó a -20 °C durante 5 min y se centrifugó nuevamente en las mismas condiciones. El pellet se resuspendió en 200 µL de guanidina 6 M y se sonicó hasta su completa solubilización. La absorbancia se midió a 375 nm utilizando agua destilada como blanco. El contenido de carbonilos se expresó como nmol de carbonilos por mg de proteína, calculado a partir de la absorbancia usando el coeficiente de extinción molar del DNPH. Los análisis se realizaron por duplicado.

IV.5 Determinaciones para chorizo de cerdo

IV.5.1 Color, pH y temperatura

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la sección IV.4.1

IV.5.2 Textura

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la sección IV.4.2

IV.5.3 Oxidación lipídica

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la sección IV.4.3

IV.5.4 Oxidación proteica

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la sección IV.4.4

IV.6 Vida de anaquel

Para evaluar la vida útil, las muestras de jamón se empacaron al vacío en un material con baja permeabilidad al oxígeno y se almacenaron en refrigeración a 4 °C. En contraste, las muestras de chorizo se mantuvieron suspendidas a temperatura ambiente. El muestreo se realizó en los días 0, 7 y 12 para el chorizo, y en los días 0, 7 y 14 para el jamón, con el fin de llevar a cabo los análisis correspondientes.

IV.7 Diseño experimental y análisis estadístico

Los resultados se analizaron conforme al diseño establecido. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95 % y comparaciones múltiples por medio de la prueba de Tukey. Para las medidas repetidas en el tiempo, se realizó un análisis estadístico de las tendencias temporales de las variables evaluadas. Todos los análisis se realizaron utilizando el programa estadístico RStudio (versión 4.4.0, USA).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1 Caracterización del almidón nativo y modificado de leguminosa

Los resultados de los almidones nativos y modificados mediante extrusión reactiva se presentan a continuación.

V.1.1 Perfil de viscosidad

En el Cuadro 5 se presentan los parámetros del perfil de viscosidad de los almidones de haba y lenteja en sus formas nativa, control (extrusión sin OSA) y modificada con octenil succinato (OSA) mediante extrusión reactiva. Se observa que en la mayoría de las muestras

extrudidas (control y OSA) no es posible determinar parámetros como temperatura de pasting y viscosidad máxima, lo cual se atribuye a la pérdida de integridad del gránulo de almidón por efecto del cizallamiento y la temperatura durante el proceso. Esta alteración estructural limita las transformaciones fisicoquímicas como la gelatinización, lo que impide generar perfiles de viscosidad bien definidos. No obstante, el almidón control de lenteja si presentó valores medibles de viscosidad, lo que sugiere una menor susceptibilidad a la degradación bajo las condiciones de extrusión empleadas, posiblemente debido a que el tamaño de gránulo de la lenteja es menor. Por otro lado, los almidones nativos mostraron parámetros consistentes con lo descrito por González-Mendoza y col. (2025).

Cuadro 5. Parámetros del perfil de viscosidad en almidones de haba y lenteja bajo condiciones control, nativas y modificadas por extrusión química.

Tratamiento*	Almidón	Tps (°C)	η_{pk} (cP)	$\Delta\eta_{bd}$ (cP)	$\Delta\eta_{sd}$ (cP)	η_f (cP)
Control	Haba	nd	nd	nd	nd	270.1 ± 40.00
Nativo	Haba	68.5 ± 0.03	845.9 ± 0.68	30.9 ± 3.61	505.6 ± 7.25	1321.0 ± 8.25
OSA	Haba	nd	nd	nd	nd	45.8 ± 15.69
Control	Lenteja	nd	213.4 ± 1.25	19.4 ± 2.84	76.3 ± 33.77	270.2 ± 36.55
Nativo	Lenteja	70.6 ± 0.81	819.3 ± 38.80	9.8 ± 4.48	324.2 ± 36.58	1133.8 ± 1.70
OSA	Lenteja	nd	nd	nd	nd	20.4 ± 1.80

* Control, extrusión sin OSA; Nativo, almidón nativo; OSA, extrusión con OSA. Nd, no detectable; Tps, temperatura de la pasta; η_{pk} , viscosidad máxima; $\Delta\eta_{bd}$, caída; $\Delta\eta_{sb}$, retrogradación; η_f , viscosidad final. HCl. Los valores se expresan como media ± desviación estándar.

Las diferencias en los perfiles de viscosidad se muestran en la Figura 2. Los almidones nativos presentaron un comportamiento característico con etapas definidas de gelatinización, ruptura y retrogradación, además de presentar los valores más altos de viscosidad. El almidón nativo de haba presentó un mayor pico de viscosidad, lo que sugiere una mayor capacidad de hinchamiento y viscosidad. En contraste, las muestras extrudidas

(control y OSA) evidenciaron diferencias en su comportamiento. La ausencia de un pico definido de gelatinización indica la pérdida de la estructura granular durante el proceso de extrusión, que puede corroborarse mediante las micrografías presentadas en la Figura 3. Adicionalmente, la incorporación de grupos octenil succinato introduce cambios en las interacciones moleculares del almidón, contribuyendo a una mayor estabilidad frente a ciclos de calentamiento y enfriamiento y a una menor tendencia a la retrogradación (Altuna y col., 2018).

Los resultados indican que la extrusión combinada con la modificación química por OSA produce sistemas con perfiles de viscosidad estables al proceso de calentamiento y enfriamiento y menos dependientes de transformaciones estructurales, lo que los hace adecuados para aplicaciones en las que se requiere alta retención de agua sin cambios significativos en el comportamiento durante el procesamiento.

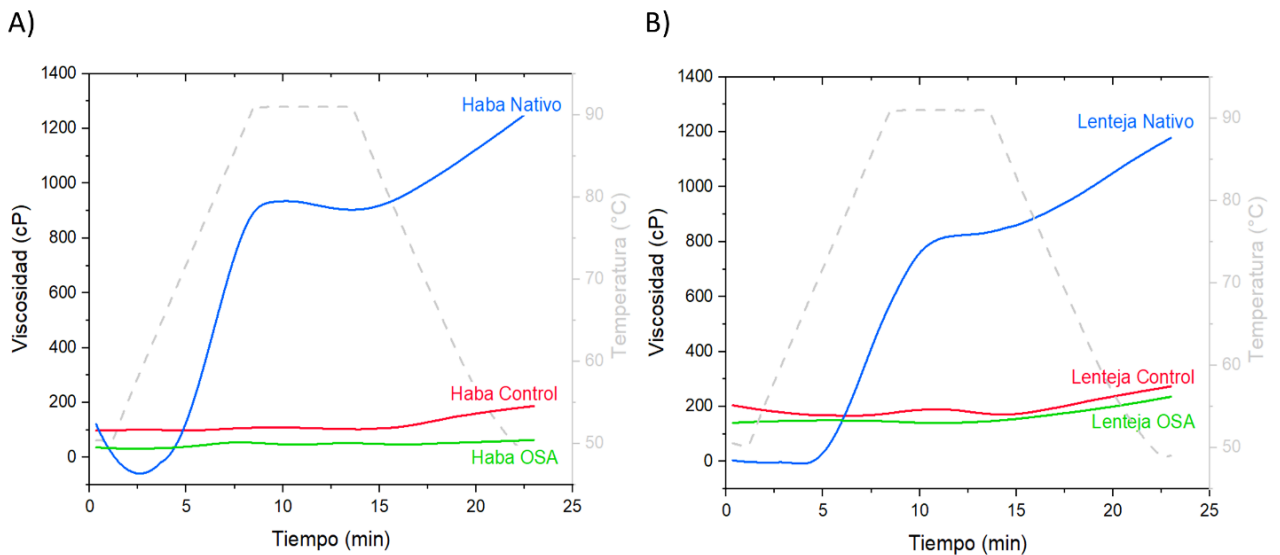


Figura 2. Perfil de viscosidad en almidones de haba (A) y lenteja (B) bajo condiciones nativas, control (extrusión sin OSA) y modificadas por extrusión con OSA. La línea discontinua representa el perfil de temperatura (°C). Nativo (azul), Control (rojo) y OSA (verde).

V.1.2 Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías de los almidones permiten el análisis de la morfología de los gránulos de

almidón. En la Figura 3 se muestran diferencias notables entre los gránulos de almidón nativo y aquellos modificados mediante extrusión reactiva con anhídrido octenil succínico (OSA). En el almidón nativo se observan superficies lisas y contornos bien definidos, con integridad estructural, características típicas de gránulos con una organización semicristalina estable. En contraste, las muestras modificadas presentan superficies fracturadas y estructuras colapsadas, como consecuencia de la pérdida de la estructura debido a efectos durante el proceso de extrusión.

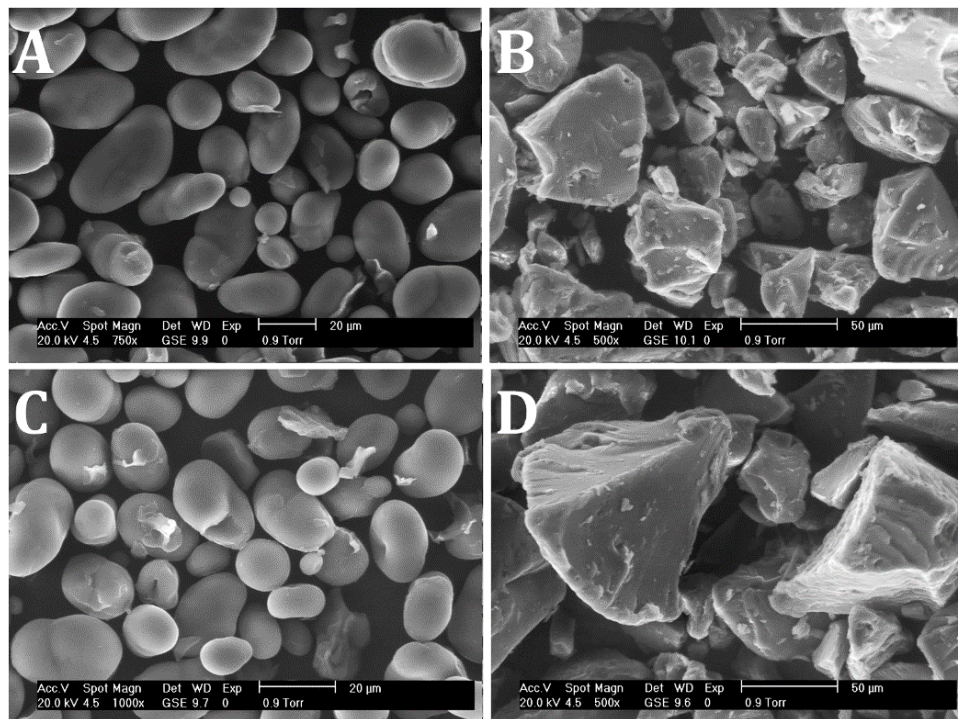


Figura 3. Micrografías SEM del almidón nativo de haba (A) y lenteja (C), almidón extrudido OSA de haba (B) y lenteja (D).

El proceso de extrusión induce una gelatinización parcial o completa, en la cual la energía térmica y las condiciones de reacción rompen las regiones cristalinas del almidón, promoviendo la formación de una matriz amorfa (Huang y col., 2022). Adicionalmente, la incorporación de grupos octenil succinato introduce dominios anfífilicos en la molécula, lo que altera la organización interna de las cadenas de glucosa y modifica las interacciones intra e intermoleculares. Como consecuencia, los gránulos pierden rigidez y orden

estructural, adquiriendo una morfología rugosa, fisurada o porosa, de acuerdo con lo reportado por Ovando-Martínez y col. (2017).

V.1.3 Espectroscopia infrarroja

Los espectros de FTIR del almidón de haba y lenteja en sus diferentes tratamientos se presentan en la Figura 4. En las muestras modificadas mediante extrusión reactiva con anhídrido octenil succínico (OSA) se observa la aparición de una banda en la región de 1720–1740 cm^{-1} , atribuida al estiramiento del grupo carbonilo (C=O) de enlaces éster formados entre el OSA y los grupos hidroxilo del almidón (Zhou y col., 2023).

Adicionalmente, se observa una disminución en la intensidad de la banda asociada a los grupos hidroxilo (3400 cm^{-1}), lo que sugiere una reducción de interacciones por enlaces de hidrógeno, correspondiente tanto a la sustitución química como a la modificación estructural por el proceso de extrusión. Asimismo, se aprecian variaciones en la región de 1000–1200 cm^{-1} , asociada a vibraciones de enlaces C–O y C–O–C, lo que indica cambios en la organización estructural del almidón posterior a la modificación. Estos cambios evidencian modificaciones en la organización molecular del almidón, asociadas con la incorporación de grupos octenil succinato en la estructura del polímero y con la pérdida de orden estructural.

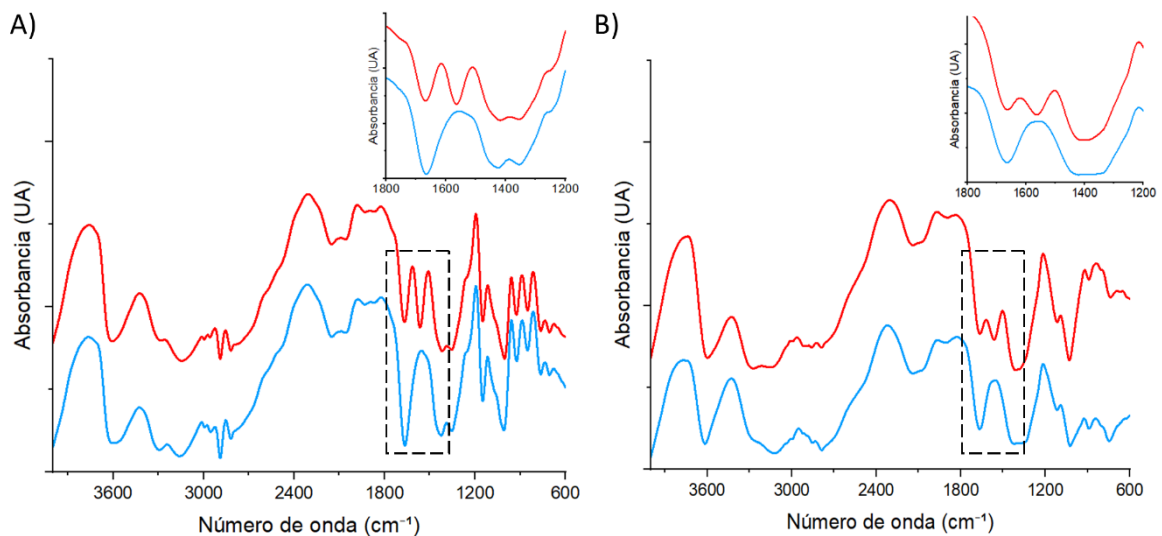


Figura 4. Espectros de FTIR. (A) Almidón de haba y (B) Almidón de lenteja. Extruido control sin OSA (azul) y extrudido con OSA (rojo).

V.2 Determinaciones para jamón de cerdo

La evaluación del jamón de cerdo elaborado con la adición de almidón modificado por extrusión reactiva se realizó mediante un análisis en el tiempo, en donde se estimaron las tendencias para cada variable evaluada. A continuación, se describen los resultados obtenidos.

V.2.1 Color, pH y temperatura

Para la evaluación del pH y color en el tiempo, se estimaron los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente) a partir de modelos de primer orden; los resultados se presentan en los Cuadros 6 y 7. La temperatura de almacenamiento de los jamones se mantuvo constante a 4°C.

En el Cuadro 6 se presentan los resultados del análisis de la ordenada al origen, donde el pH de los diferentes jamones se mantuvo en un rango de estabilidad entre 6.10 y 6.22, sin diferencias significativas entre tratamientos. La adición de almidones de leguminosas no altera la acidez basal del producto terminado. La estabilidad observada puede atribuirse al efecto amortiguador de los ingredientes empleados en la formulación del jamón, particularmente sales y fosfatos, los cuales contribuyen a mantener el equilibrio iónico y reducir cambios importantes en la concentración de protones durante el almacenamiento (Goemaere y col., 2021). Respecto a las variables de color en cuanto ordenada al origen se puede observar que hubo diferencias significativas entre tratamientos siendo significativos los efectos para el tipo de carne, la concentración y el almidón; estos factores explican en gran medida el comportamiento del color inicial de los jamones ya que su significancia estadística podría atribuirse a que el almidón compensa la pérdida de funcionalidad de las proteínas desnaturalizadas principalmente en carne PSE al formar una matriz de gel que atrapa agua y estabiliza el sistema. Aunado a que si se presentan diferencias significativas para el efecto del a^* por el tipo de carne. Efectos esperados para carne con defecto PSE.

Los datos de las pendientes se presentan en el cuadro 7, donde se resaltan que no hay cambios en los tratamientos respecto al tiempo en la variable pH, con pendientes cercanas

a cero (0.00–0.01), lo que indica una alta estabilidad del sistema durante el tiempo de almacenamiento. Este comportamiento coincide con lo reportado por (Fernández y col., 2004), quienes señalaron que productos cárnicos emulsificados con ingredientes funcionales tienden a mantener valores de pH relativamente constantes debido a la capacidad buffer de las proteínas cárnicas y los polisacáridos.

Cuadro 6. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ de las variables de calidad en jamón de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
pH	6.13	6.17	6.22	6.17	6.16	6.10	6.14	6.10	0.029	0.16
Luminosidad (L*) ^{c, e}	77.36	78.23	76.63	75.80	78.81	80.76	77.44	76.67	0.589	0.00
Rojo-verde (a*) ^c	7.59	7.64	8.09	8.23	7.45	7.19	7.48	7.42	0.235	0.09
Amarillo-azul (b*) ^{e, f}	11.04	10.94	10.47	11.31	10.93	11.10	11.04	12.97	0.227	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^d Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^e Interacción Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

El parámetro L* representa la luminosidad del producto, donde los valores altos indican mayor claridad y valores bajos mayor oscuridad. En este caso, se puede observar que no hay diferencias entre tratamientos. Sin embargo, en el Cuadro 7 se observa que la mayor parte de los tratamientos mostraron pendientes negativas para L*, indicando una disminución de la luminosidad durante el almacenamiento, indicativo de que el producto se está secando. La luminosidad presentó la interacción Carne*Almidón significativa. Lo que sigue es que el tipo de carne y la adición de almidones de diversas fuentes modifica el comportamiento de la luminosidad del producto. En donde se observa que cuando se

trabaja con carne PSE se tienen pendientes positivas indicativo que la luminosidad incrementa al paso del tiempo, excepto para PH5. Este fenómeno se atribuye a la estructura proteica desnaturalizada de la carne PSE. Barbut y col. (2008), explica que la carne PSE sufre una desnaturalización acelerada de las proteínas sarcoplásmicas, lo cual provoca que el agua salga de las fibras y quede en la superficie, lo que genera una mayor reflexión de la luz. La reducción de la luminosidad durante el almacenamiento puede asociarse con cambios fisicoquímicos y oxidativos en la matriz cárnica. La oxidación de lípidos y pigmentos, así como la pérdida de agua superficial, pueden disminuir la capacidad del producto para reflejar la luz, generando una apariencia más oscura.

Cuadro 7. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ de las variables de calidad en jamón de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
pH ^d	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.003	0.21
Luminosidad (L*) ^d	-0.04	-0.01	-0.15	-0.05	0.02	-0.09	0.02	0.19	0.066	0.08
Rojo-verde (a*)	-0.11	-0.12	-0.06	-0.12	-0.12	-0.14	-0.12	-0.11	0.032	0.84
Amarillo-azul (b*) ^{c,d}	0.07	0.10	0.12	0.12	0.05	0.09	0.04	-0.05	0.030	0.02

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^d Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

En carnes PSE, la desnaturalización proteica ocasiona menor capacidad de retención de agua y una estructura muscular más abierta, lo que generalmente incrementa la reflexión de la luz y produce una apariencia más pálida (Hughes y col., 2014). Sin embargo, durante el almacenamiento, la pérdida de humedad y los cambios oxidativos pueden alterar esta condición inicial y provocar disminución de L*. Por otro lado, la incorporación de almidones puede modificar la luminosidad debido a su capacidad de absorción de agua y formación

de geles, aumentando la dispersión de la luz dentro de la matriz cárnica.

Respecto a la variable a^* no se observaron diferencias y esto pudo deberse a la propia formulación del producto, que, aunque provenga de carne PSE, logra tener la misma tonalidad que un jamón elaborado con carne normal al paso del tiempo. En el Cuadro 7 se observa que todos los tratamientos mostraron pendientes negativas, indicando una disminución progresiva de la tonalidad roja durante el almacenamiento. Este comportamiento sugiere una pérdida gradual de estabilidad del color, asociada principalmente con procesos oxidativos de los pigmentos musculares. Aunque estadísticamente no se mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), la tendencia negativa en todos los casos evidencia que el almacenamiento afectó la estabilidad del color rojo independientemente del tipo de carne o del almidón utilizado. Según Mancini y col. (2005), la disminución de a^* en productos cárnicos se relaciona principalmente con la oxidación de la oximioglobina hacia metamioglobina.

Para el índice amarillo-azul (b^*), se observó una tendencia de incremento, la cual se refleja en pendientes positivas en la mayoría de los tratamientos (0.04–0.12). Este aumento en los tonos amarillos es un indicador indirecto del avance de la oxidación lipídica y la formación de compuestos carbonilos que interactúan con las proteínas, alterando la reflectancia del producto (Domínguez y col., 2019). Únicamente el tratamiento PL5 mostró una ligera pendiente negativa (-0.05), sugiriendo otro comportamiento cuando se usa almidón de lenteja.

Según Mancini y col. (2005), los cambios en los parámetros de color durante el almacenamiento de productos cárnicos están estrechamente relacionados con procesos oxidativos que afectan tanto los lípidos como los pigmentos musculares. La formación de compuestos secundarios de oxidación puede generar tonalidades amarillentas y modificar la reflectancia de la luz en la superficie del producto. Asimismo, Suman y col. (2013) señalan que el incremento de b^* durante el almacenamiento puede asociarse con la oxidación de la mioglobina y la acumulación de metabolitos derivados de la oxidación lipídica, especialmente en productos cárnicos cocidos. Estos procesos alteran la estabilidad cromática y favorecen la aparición de tonos amarillos o pardos.

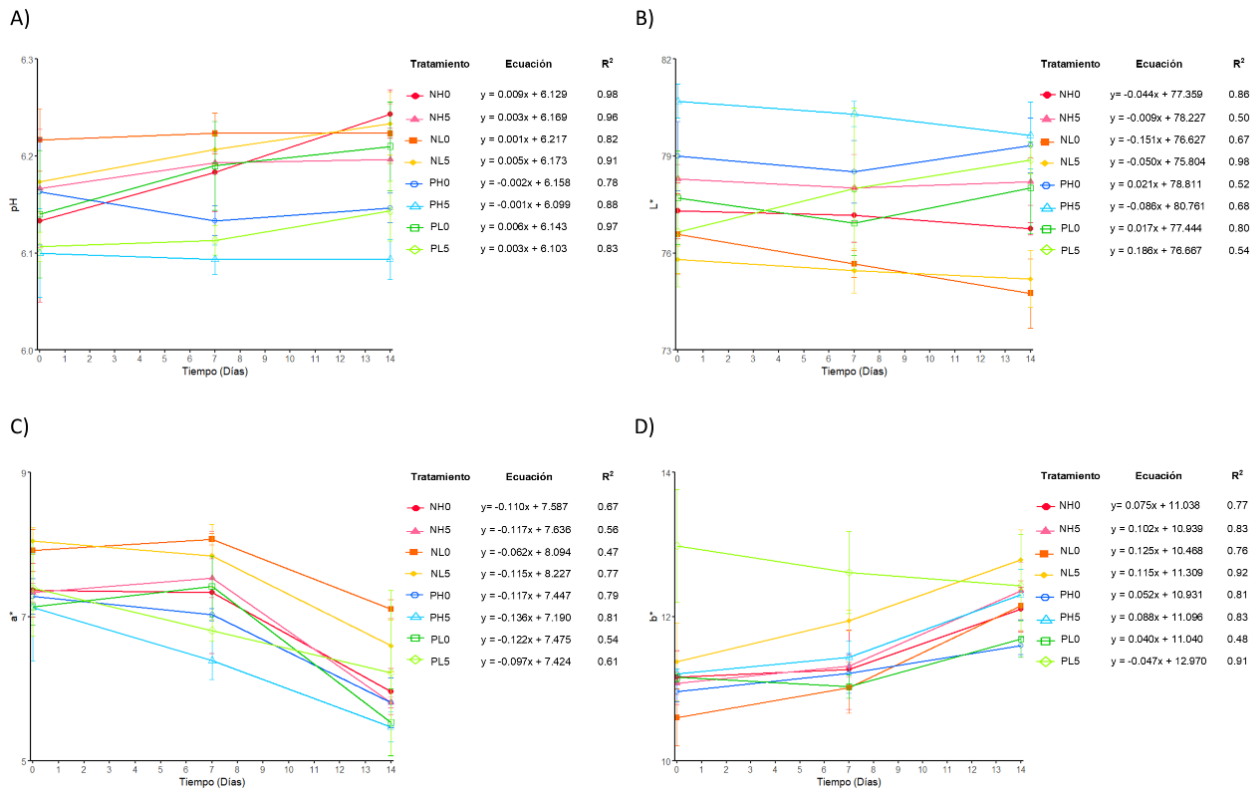


Figura 5. Modelos de regresión lineal. A) pH; B) luminosidad (L*); C) índice rojo-verde y D) índice amarillo-azul. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Las mediciones de color se realizaron con colorímetro MiniScan HunterLab (iluminante D65 y ángulo del observador de 10°). Los datos se expresan como media (n = 3).

En la Figura 6, se muestra la evolución estética y estabilidad de jamones de cerdo formulados con carne normal y carne PSE. Durante el almacenamiento, se observa una pérdida de luminosidad en el producto, exhibiendo una coloración más opaca hacia el final del periodo.

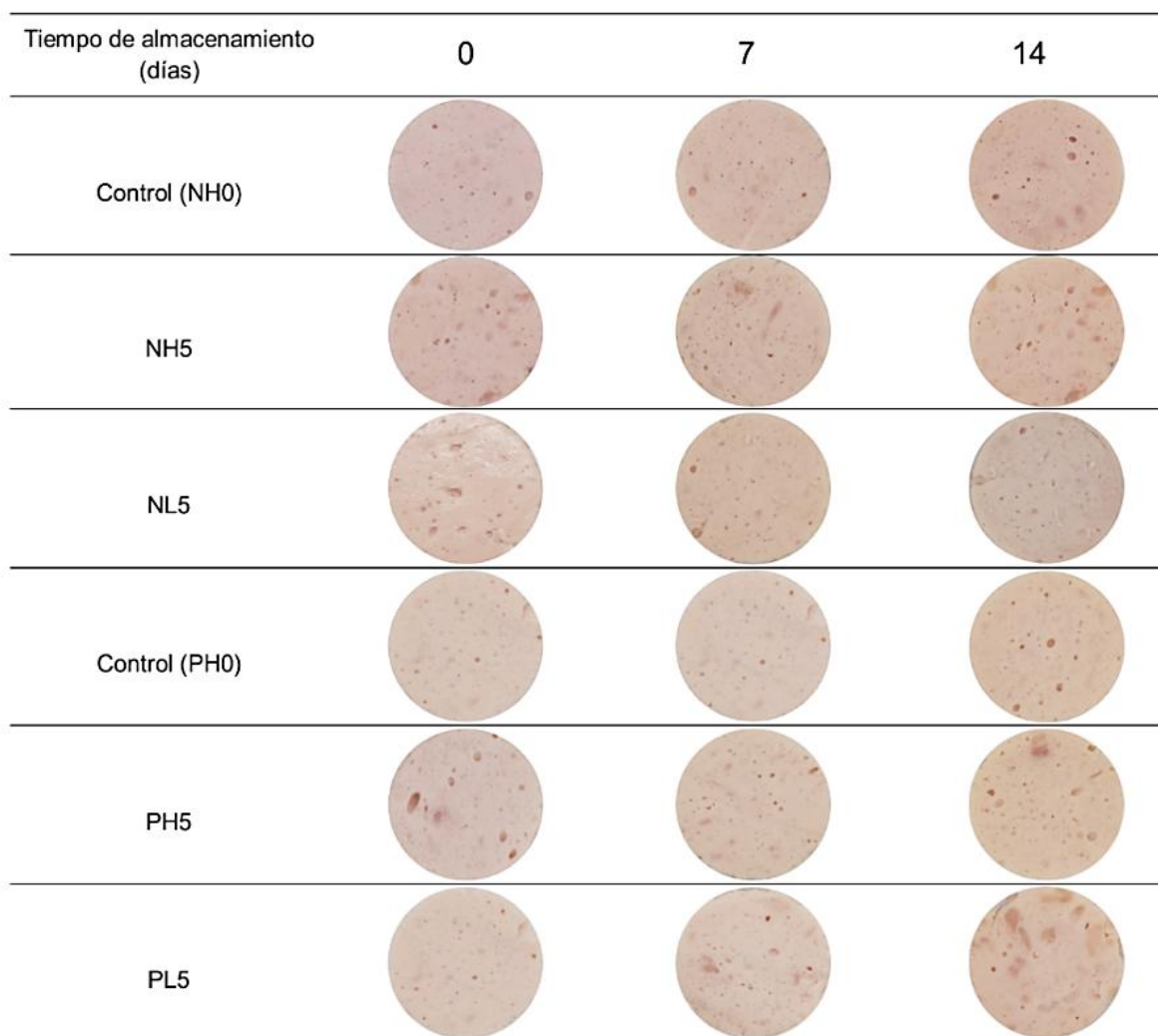


Figura 6. Imágenes en el tiempo de los jamones de cerdo. 14 días de almacenamiento a temperatura ambiente. Control NH0: carne normal con almidón de haba 0%; NL5: carne normal con almidón de lenteja al 5%; NH5: carne normal con almidón de haba al 5%; Control PH0: carne normal con almidón de haba 0%; PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 5%; PH5: carne PSE con almidón de haba al 5%.

V.2.2 Textura

Los resultados del perfil de textura (TPA) en función del tiempo se presentan a continuación. Se estimaron los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente) mediante modelos de primer orden; los resultados se presentan en los Cuadros 8 y 9, y de forma gráfica en la Figura 7. En donde se observa que las variaciones en la formulación modificaron de manera

directa la estructura del producto cárnico. Siendo significativas algunas interacciones que se explicarán a continuación.

Cuadro 8. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de jamón de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	p<
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
Dureza (N) ^e	6.10	5.67	5.43	6.78	10.18	7.11	10.06	1.44	0.329	0.00
Cohesión ^d	1.75	1.68	1.84	1.66	1.41	1.73	1.49	1.79	0.042	0.00
Elasticidad (mm) ^c	2.60	2.81	2.53	2.63	3.07	3.35	2.57	2.33	0.122	0.00
Gomosidad (N) ^e	4.95	5.50	4.64	3.66	9.23	6.29	8.65	0.83	0.471	0.00
Masticabilidad (mJ) ^c	15.19	9.33	13.70	10.61	39.76	35.86	21.32	12.96	5.838	0.01

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^d Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^e Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

En el Cuadro 8, se observaron diferencias significativas entre tratamientos y la triple interacción ($p < 0.05$). Esto indica que el tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración de los almidones influyeron sobre la firmeza inicial del producto. En el Cuadro 9, las pendientes de la dureza fueron positivas en todos los tratamientos (0.13–0.61), evidenciando que la dureza aumentó durante el almacenamiento. El mayor incremento ocurrió en PH0 (0.61), mientras que PL0 presentó el menor cambio (0.13). Según Barbut y col. (2008), los incrementos de dureza durante el almacenamiento pueden asociarse con la reorganización de proteínas miofibrilares y pérdida gradual de agua en productos emulsificados. Asimismo, Hughes y col. (2014) mencionan que la disminución del agua libre favorece una estructura más compacta y resistente, aumentando la fuerza requerida para deformar el producto. El tratamiento PL5 (PSE, almidón de lenteja y 5% de adición) mostró

una menor dureza inicial y menor incremento durante el tiempo, probablemente debido a una mayor retención de agua y formación de geles menos compactos.

Cuadro 9. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de jamón de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
Dureza (N) ^h	0.31	0.51	0.54	0.24	0.61	0.49	0.13	0.39	0.078	0.01
Cohesión ^{e,f}	-0.05	-0.03	-0.05	-0.02	-0.01	-0.04	-0.03	-0.05	0.006	0.00
Elasticidad (mm) ^{c,d}	0.04	0.01	0.05	0.07	-0.01	-0.02	0.02	0.05	0.017	0.02
Gomosidad (N) ^{e,f,g}	0.36	0.12	0.50	0.36	0.56	0.41	0.20	0.43	0.062	0.00
Masticabilidad (mJ) ^f	0.22	3.21	1.61	3.03	-0.09	0.27	0.85	1.02	0.509	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^d Efecto de tipo de almidón ($p < 0.05$).

^e Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^f Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^g Interacción Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

^h Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

Otro parámetro que se evaluó fue la cohesión, la cual refleja la capacidad del producto para mantener su estructura interna después de una deformación. En el Cuadro 8 se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$), destacándose NL0 (1.84) y PL5 (1.79) con los mayores valores iniciales. Esto sugiere una estructura interna relativamente estable en estos tratamientos. Sin embargo, las pendientes del Cuadro 9 fueron negativas en todos los tratamientos, indicando que la cohesión disminuyó durante el almacenamiento ($p < 0.05$). Esta reducción sugiere debilitamiento progresivo de las interacciones internas de la matriz cárnica. Según Bourne (2002), la disminución de cohesión durante el almacenamiento puede relacionarse con cambios estructurales en la red proteica y redistribución del agua

dentro del sistema. Asimismo, Xiong (2005) señala que la estabilidad de emulsiones cárnicas depende de la integridad de la red tridimensional formada por proteínas y polisacáridos.

En el Cuadro 8, se observaron diferencias significativas en la elasticidad entre tratamientos y los efectos principales tipo de carne y tipo de almidón ($p < 0.05$). Por otro lado, en el Cuadro 9, la mayoría de los tratamientos mostraron pendientes positivas para elasticidad, indicando un ligero incremento durante el almacenamiento, excepto PH0 y PH5, donde las pendientes fueron negativas. Estas diferencias son las que marcan la pauta para el efecto del tipo de almidones, y se pudiera deber a las diferencias entre almidones ya discutidas anteriormente. Por otra parte, de acuerdo con Herrero y col. (2008), la elasticidad está relacionada con la flexibilidad de la red proteica y la capacidad de retención de agua. Los incrementos observados podrían deberse a reorganización gradual del gel proteico durante el almacenamiento.

La gomosidad representa la energía necesaria para desintegrar un alimento semisólido y depende principalmente de la dureza y cohesión. En el Cuadro 8, PH0 (9.23 N) y PL0 (8.65 N) presentaron los mayores valores iniciales, mientras que PL5 mostró el valor más bajo (0.83 N), observándose diferencias significativas ($p < 0.05$) para la ordenada al origen, así como las dobles interacciones. Las pendientes del Cuadro 9 fueron positivas en todos los tratamientos, indicando incremento de la gomosidad durante el almacenamiento ($p < 0.05$). Según Bourne (2002), incrementos en gomosidad suelen asociarse con matrices más compactas y resistentes a la deformación. Asimismo, Barbut y col. (2008) menciona que la pérdida de humedad y la reorganización proteica durante el almacenamiento favorecen texturas más gomosas.

Finalmente, en masticabilidad se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, así como la interacción entre tipo de carne y concentración de almidón ($p < 0.05$) para la ordenada al origen. En el Cuadro 9, la mayoría de los tratamientos mostraron pendientes positivas, indicando aumento de la masticabilidad durante el almacenamiento. Hughes y col. (2014) reporta que la masticabilidad aumenta cuando la estructura del gel proteico se vuelve más densa y resistente debido a la pérdida de agua y fortalecimiento de

interacciones internas, lo que pudiera explicar este comportamiento.

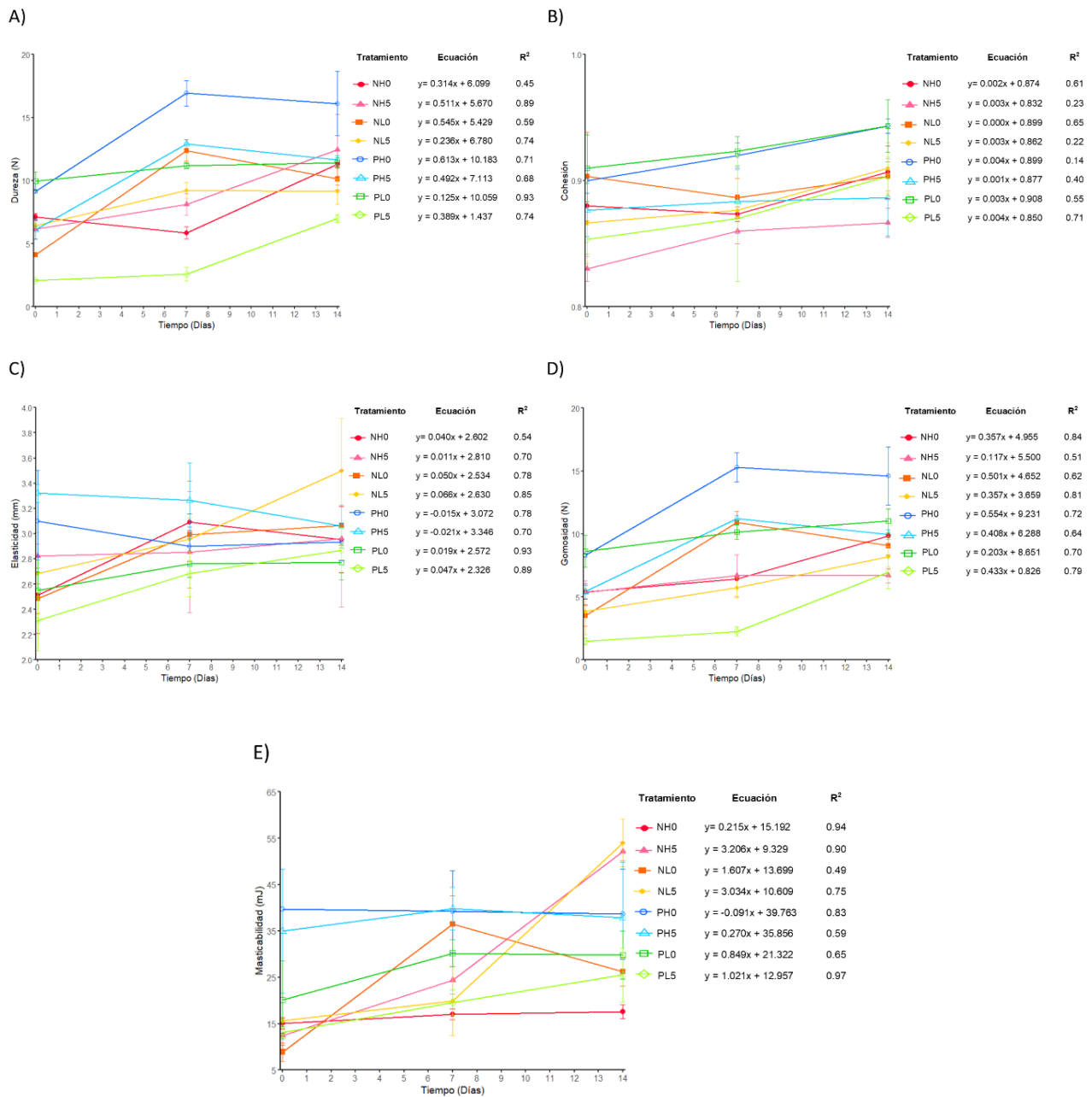


Figura 7. Modelos de regresión lineal. A) dureza, B) cohesión, C) elasticidad, D) gomosidad y E) masticabilidad en jamones de cerdo. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

V.2.3 Oxidación lipídica

La oxidación lipídica en los jamones de cerdo fue descrita mediante un modelo polinomial de segundo grado, estimándose los parámetros β_0 (ordenada al origen), β_1 (componente lineal) y β_2 (componente cuadrático); los resultados se presentan en los Cuadros 14, 15 y 16 respectivamente.

En la Figura 8, se presentan los valores de TBARS, expresados en mg de malonaldehído (MDA) por kg de muestra, mostrando un comportamiento dinámico ajustado a modelos polinomiales de segundo grado, lo que refleja las distintas etapas de la formación y degradación de compuestos de oxidación primaria y secundaria.

Cuadro 10. Ordenada al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo.

Tratamiento ^{a,b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
1.44	1.52	1.53	1.52	1.36	1.51	1.32	1.49	0.031	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Interacción Carne*Concentración ($p<0.05$).

^c EE, Error estándar.

La ordenada al origen presentó diferencias significativas entre tratamientos; las formulaciones con carne normal presentaron valores más altos, específicamente NL0, NL5 y NH5, mientras que el tratamiento PL0 sin incorporación de almidón presentó valores más bajos. Este comportamiento puede asociarse con la mayor susceptibilidad oxidativa de las matrices con mayor disponibilidad de agua y mayor exposición de lípidos a especies reactivas de oxígeno (Domínguez y col., 2019).

El análisis de los factores confirmó que la interacción de la carne y la concentración de almidón tienen efecto significativo. Estos resultados sugieren que la respuesta de la

oxidación lipídica tanto de la calidad de la materia prima como de la capacidad de los ingredientes funcionales para modificar la estructura del jamón. Haddad y col., 2017 señalaron que ingredientes como maltodextrina, carragenina y almidones modificados ayudan a estabilizar productos elaborados con carne PSE debido a su capacidad para mejorar la estabilidad estructural y reducir pérdidas de agua durante el procesamiento y almacenamiento. Los almidones de haba y lenteja posiblemente alteraron la movilidad del agua y la exposición de los lípidos al oxígeno, afectando indirectamente la formación de compuestos secundarios de oxidación.

Cuadro 11. Componente lineal del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo.

Tratamiento ^{a,b,c}								EE ^d	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
-0.42	-0.22	-0.42	-0.18	-0.06	-0.31	-0.23	-0.41	0.050	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^c Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^d EE, Error estándar.

En Cuadro 11 se presentan los valores del componente lineal, se observaron diferencias significativas entre tratamientos y la interacción significativa entre carne-almidón y carne-concentración. Se observa una clara disminución de la oxidación del día 0 al 12 y esto pudiera deberse a que se inició con una carne con un alto grado de oxidación (dentro de los límites aceptables) y que estas especies secundarias iniciales estén pasando a compuestos terciarios de la oxidación (compuestos que no mide la reacción de TBARS). El comportamiento diferente entre tratamientos, observado en la Figura 8, implicaría una menor velocidad de disminución de productos secundarios de oxidación. De Barros y col., 2017 indicaron que la desnaturalización proteica observada en carne PSE altera la estructura tridimensional de las proteínas y modifica la firmeza y funcionalidad tecnológica de productos cárnicos reestructurados. Estas modificaciones estructurales también podrían

influir sobre la disponibilidad de oxígeno, la liberación de hierro prooxidante y la accesibilidad de los lípidos a las reacciones oxidativas, alterando la velocidad de propagación de la oxidación lipídica.

Cuadro 12. Componente cuadrático del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo}) + \beta_2(\text{tiempo}^2)$ para oxidación lipídica de jamón de cerdo.

Tratamiento ^{a,b,c}								EE ^d	p<
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
0.33	0.41	0.30	0.36	0.21	0.38	0.21	0.25	0.039	0.01

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^c Efecto de concentración de almidón ($p < 0.05$).

^d EE, Error estándar.

En relación con el componente cuadrático presentado en el Cuadro 12, se detectaron diferencias significativas. La significancia del componente cuadrático coincide con lo reportado por Wenjiao y col. (2014), quienes desarrollaron modelos predictivos de TBARS en embutidos de cerdo almacenados a diferentes temperaturas y observaron que la evolución oxidativa presenta comportamientos cinéticos complejos y no estrictamente lineales. Los autores señalaron que la oxidación lipídica en productos cárnicos depende de múltiples factores asociados con composición, almacenamiento y características fisicoquímicas del sistema, justificando el uso de modelos matemáticos para describir la dinámica oxidativa.

Los tratamientos PH0 y PL0 presentaron los valores más bajos del coeficiente cuadrático, indicando un comportamiento oxidativo más estable y menos dependiente del tiempo. Estos resultados sugieren que las formulaciones elaboradas con carne PSE sin incorporación de almidón presentaron menores variaciones en la velocidad de formación de compuestos secundarios de oxidación durante el almacenamiento. Mientras que el análisis factorial mostró significancia entre los efectos individuales del tipo de carne y la concentración de almidón adicionado. Esto sugiere que los almidones de haba y lenteja modificaron la

evolución de la oxidación lipídica durante el almacenamiento, posiblemente mediante cambios en la movilidad del agua, estabilidad de la emulsión y disponibilidad de los lípidos a las reacciones oxidativas.

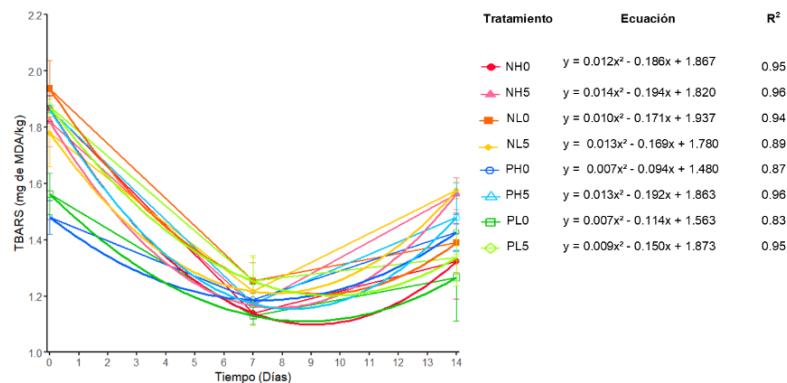


Figura 8. Modelos de regresión polinomial de segundo grado para TBARS en jamones de cerdo. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

V.2.4 Oxidación proteica

La oxidación proteica en el jamón se describió mediante un modelo de primer orden, estimándose los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente); los resultados se presentan en los Cuadros 13 y 14 y de forma gráfica en la Figura 9.

En el Cuadro 13 se observan los valores de la ordenada al origen obtenidos para el modelo de oxidación proteica. El tratamiento PH5 presentó los valores iniciales más altos, lo que indica una mayor susceptibilidad oxidativa al inicio del almacenamiento. Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza de la carne PSE, que se caracteriza por una baja capacidad de retención de agua (CRA), textura blanda y apariencia pálida, condiciones originadas por la rápida glucólisis muscular post mortem y la consecuente desnaturalización de proteínas. Estas alteraciones estructurales favorecen la exposición de grupos reactivos susceptibles a oxidación, incrementando así la formación de compuestos

oxidativos (Barbut y col., 2008).

Cuadro 13. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de jamón de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
51.94	44.65	35.97	50.40	32.39	83.16	53.99	70.64	6.108	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Triple interacción Carne*Almidón*Concentración (*p*<0.05).

Por el contrario, los tratamientos NL0 y PH0 presentaron los valores más bajos de ordenada, lo que sugiere una menor oxidación inicial de las proteínas. En el caso de NL0, este comportamiento podría atribuirse a la mayor estabilidad estructural de la carne normal y a una mejor integridad de las proteínas miofibrilares. Mientras tanto, en PH0, la ausencia de almidón pudo limitar modificaciones microestructurales relacionadas con la movilidad del agua y la interacción proteína-polisacárido, reduciendo la susceptibilidad oxidativa inicial del sistema.

Cuadro 14. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de jamón de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
3.20	-1.52	2.65	-1.24	3.65	-4.36	0.81	-1.59	0.398	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Triple interacción Carne*Almidón*Concentración (*p*<0.05).

El Cuadro 14 evidencia diferencias significativas en las pendientes, lo cual refleja

variaciones en la velocidad de oxidación proteica durante el almacenamiento. El comportamiento fue diferente para los tratamientos por lo que es difícil que los resultados muestren clara evidencia de un patrón, sin embargo, Carvalho y col., (2017) reportaron que la carne PSE fue más susceptible a la proteólisis y oxidación proteica que la carne normal durante almacenamiento refrigerado, presentando un agotamiento más intenso de triptófano y grupos tioles, mayor carbonilación proteica y una formación más elevada de enlaces cruzados entre proteínas. Este comportamiento podría relacionarse con el tratamiento PH0, el cual presentó los valores más altos de pendiente positiva, indicando una mayor velocidad de oxidación proteica a lo largo del almacenamiento. La elevada susceptibilidad oxidativa de la carne PSE puede atribuirse a la desnaturalización de proteínas miofibrilares y a la exposición de grupos reactivos que favorecen las reacciones oxidativas.

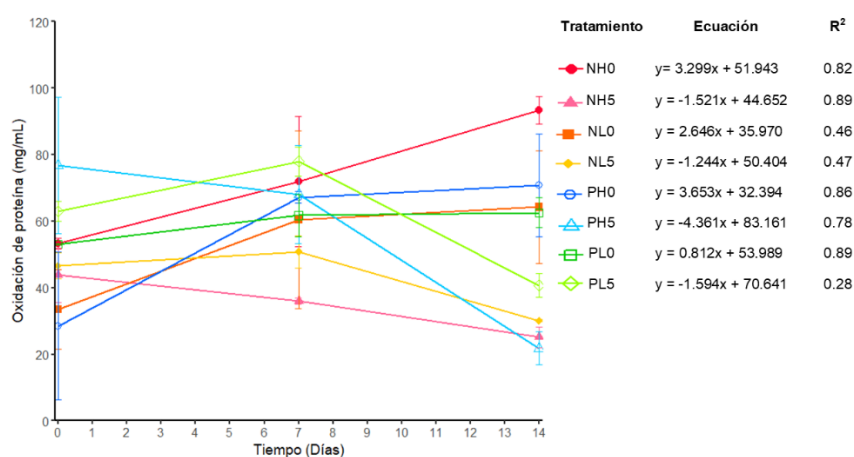


Figura 9. Modelos de regresión lineal para oxidación de proteína en jamones de cerdo. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

Asimismo, se presentó una interacción triple significativa tanto en la ordenada como en la pendiente, lo que indica que la respuesta oxidativa se modificó de acuerdo a la combinación de los tres factores evaluados: tipo de carne, tipo de almidón y concentración. Como se

pudo observar en los diferentes tratamientos, el comportamiento oxidativo no fue uniforme entre las formulaciones, evidenciando que la incorporación de almidón produjo efectos distintos dependiendo de las características de la carne y del nivel de inclusión utilizado.

V.3 Determinaciones para chorizo de cerdo

Los análisis en el tiempo se realizaron mediante la estimación de tendencias para cada variable, a continuación, se describen los resultados para el chorizo de cerdo.

V.3.1 Color, pH y temperatura

Para la evaluación del pH y color en el tiempo se estimaron los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente) a partir de modelos de primer orden; los resultados se presentan en los Cuadros 15 y 16. La temperatura de almacenamiento se mantuvo constante a 23 ± 0.98 °C.

En el Cuadro 15 se observa que los valores iniciales de pH difirieron entre tratamientos (5.03 y 5.35), lo cual era esperado debido al uso de carne PSE y normal. Estas diferencias se asocian con la glucólisis post mortem acelerada, menor capacidad amortiguadora y mayor desnaturalización proteica en la carne PSE, lo que conduce a pH más bajos (Mashood y col., 2024), mientras que la carne normal presenta mayor estabilidad proteica y valores de pH más altos. El análisis estadístico indicó efectos significativos del tipo de carne, la concentración y el almidón sobre el pH inicial; sin embargo, el efecto del almidón no se considera determinante, ya que no actúa directamente en la modificación del pH, su significancia estadística podría atribuirse a que el almidón compensa la pérdida de funcionalidad de las proteínas desnaturalizadas principalmente en carne PSE al formar una matriz de gel que atrapa agua y estabiliza el sistema.

Los datos de las pendientes se presentan en el Cuadro 16, donde se evidencian diferencias entre tratamientos en la variación del pH durante el almacenamiento. Para algunos tratamientos se observa un aumento del pH en el tiempo, este comportamiento se asocia con procesos de degradación proteica durante el almacenamiento, en los cuales la formación de compuestos nitrogenados volátiles derivados de aminoácidos contribuye a cambios en el equilibrio ácido-base del sistema cárnico, incrementando el pH con el tiempo

(Bekhit y col., 2021). Para la mayoría de tratamientos se observa una pendiente cercana a cero, lo que indica que la velocidad de cambio es nula en el tiempo, presentando mayor estabilidad.

Cuadro 15. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para el pH y las variables de color en chorizo de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
pH ^c	5.16	5.23	5.19	5.35	5.03	5.12	5.06	5.14	0.022	0.00
Luminosidad (L*) ^e	52.83	59.72	55.06	53.30	59.56	59.32	57.54	59.33	1.095	0.00
Rojo-verde (a*) ^d	15.88	14.56	16.81	15.82	15.03	17.49	15.87	14.89	0.652	0.08
Amarillo-azul (b*) ^e	21.23	18.49	17.70	19.90	21.77	24.38	22.56	22.67	0.854	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^d Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^e Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

Las variables de color luminosidad (L*), índice rojo-verde (a*) e índice amarillo-azul (b*), presentadas en la Figura 10, permitieron evaluar los cambios visuales y fisicoquímicos ocurridos al inicio y durante el almacenamiento de los tratamientos, particularmente aquellas relacionadas con la oxidación de pigmentos y los cambios en la capacidad de retención de agua.

Los tratamientos elaborados con carne PSE presentaron valores iniciales de L* superiores a los observados en la carne normal. Este comportamiento se asocia con la menor capacidad de retención de agua característica de este tipo de carne, lo que favorece una mayor dispersión de la luz y, en consecuencia, una apariencia más pálida. La luminosidad se relaciona estrechamente con el contenido y la distribución del agua en el tejido muscular,

así como la estabilidad de los pigmentos hemo, factores que en conjunto determinan la apariencia visual de la carne. En este contexto, el rápido descenso del pH post mortem influye sobre el valor de L* al inducir desnaturalización proteica y reducir la capacidad de retención de agua, favoreciendo una mayor reflectancia de la luz en la superficie muscular. Los resultados en el Cuadro 16 evidenciaron una interacción triple significativa ($p < 0.05$) entre el tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración de almidón, lo que indica que el efecto de la concentración de almidón dependió tanto del tipo de almidón utilizado como de las características fisicoquímicas de la carne. Adicionalmente, durante el proceso de maduración pueden presentarse cambios en el estado químico de la mioglobina y procesos de oxidación de los pigmentos hemo (Han y col., 2024), contribuyendo a modificaciones en la luminosidad, tal como se observa en la Figura 11.

Cuadro 16. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para el pH y las variables de color en chorizo de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	$p <$
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
pH	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.003	0.02
Luminosidad (L*) ^e	-0.22	-1.29	-1.03	-0.45	-0.79	-1.07	-0.60	-1.18	0.145	0.00
Rojo-verde (a*) ^{c, d}	-0.13	-0.11	-0.18	-0.33	0.11	-0.13	0.10	-0.08	0.051	0.00
Amarillo-azul (b*) ^c	0.15	0.09	0.25	0.06	0.25	0.08	0.29	0.20	0.073	0.24

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de concentración de almidón ($p < 0.05$).

^d Interacción Carne*Almidón ($p < 0.05$).

^e Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

Por su parte, el índice (a*) como se muestra en el Cuadro 15, no mostró diferencias iniciales significativas entre tratamientos, lo que indica una intensidad de color rojo comparable al inicio debido a la adición de los condimentos para la elaboración del chorizo. En conjunto,

la luminosidad (L^*) y el índice de rojo (a^*) presentaron una disminución durante el almacenamiento, según los resultados mostrados en la Cuadro 16, indicando un oscurecimiento del producto y pérdida de la tonalidad roja. Excepto para PH0 y PL0, pudiéndose deber a que son tratamientos provenientes de carne PSE. Este comportamiento es consistente con procesos de oxidación de pigmentos, particularmente la conversión de mioglobina a metamioglobina, asociada con tonalidades más oscuras y café (Figura 11). Asimismo, la reducción de a^* sugiere que el oscurecimiento del producto estuvo relacionado tanto con la oxidación de pigmentos como con cambios en la microestructura y en la distribución del agua, comportamiento que coincide con la interacción significativa entre el tipo de carne y el almidón observada en el Cuadro 16. La pérdida o redistribución de agua (sinéresis) puede disminuir la dispersión de la luz y favorecer una apariencia más oscura.

El índice amarillo-azul (b^*) presentó diferencias significativas entre los tratamientos iniciales, observándose los valores más altos en el tratamiento PH5. Este comportamiento coincide con la triple interacción significativa reportada en el Cuadro 15. Los valores elevados de b^* podrían atribuirse a la mayor palidez característica de la carne PSE y a cambios en la dispersión de la luz derivados de su menor capacidad de retención de agua. Asimismo, la incorporación de almidón de haba pudo modificar la microestructura del producto y favorecer la reflectancia de tonalidades amarillas presentes en la matriz cárnica.

A diferencia de L^* y a^* , las pendientes de b^* no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$), indicando una relativa estabilidad durante el almacenamiento. Como se muestra en el Cuadro 16, este parámetro presentó variaciones moderadas que no permitieron discriminar claramente entre tratamientos. Esto sugiere que el componente amarillo del color es menos sensible a los cambios estructurales y oxidativos que afectan principalmente a los pigmentos hemo. No obstante, los ligeros incrementos observados en la Figura 10 podrían asociarse con la formación de compuestos secundarios derivados de la oxidación lipídica, relacionados con tonalidades amarillentas (Domínguez y col., 2019).

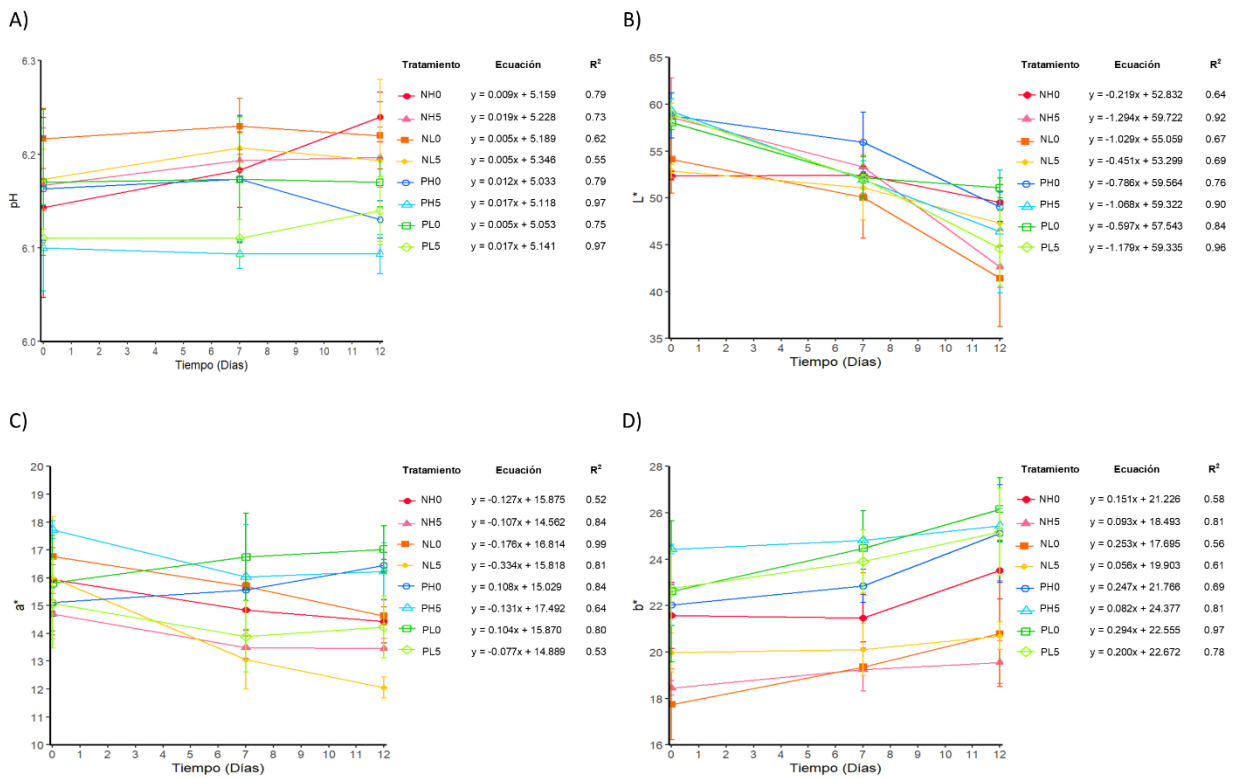


Figura 10. Modelos de regresión lineal. A) pH; B) luminosidad (L*); C) índice rojo-verde y D) índice amarillo-azul. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Las mediciones de color se realizaron con colorímetro MiniScan HunterLab (iluminante D65 y ángulo del observador de 10°). Los datos se expresan como media (n = 3).

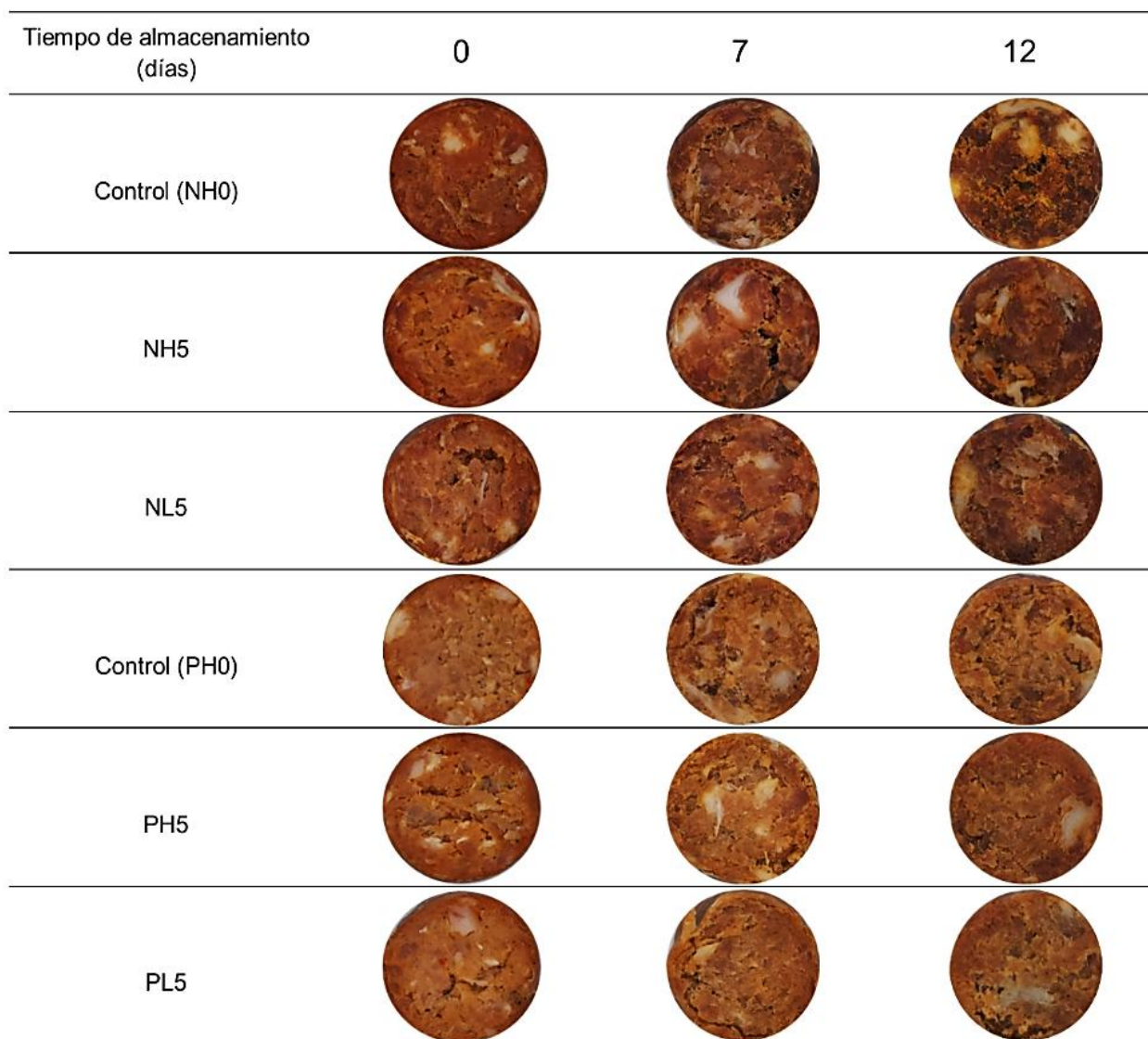


Figura 11. Imágenes en el tiempo de los chorizos de cerdo. 12 días de almacenamiento a temperatura ambiente. Control NH0: carne normal con almidón de haba 0%; NL5: carne normal con almidón de lenteja al 5%; NH5: carne normal con almidón de haba al 5%; Control PH0: carne normal con almidón de haba 0%; PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 5%; PH5: carne PSE con almidón de haba al 5%.

V.3.2 Textura

Para el perfil de textura (TPA) en función del tiempo, se estimaron los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente) mediante modelos de primer orden; los resultados se

presentan en los Cuadros 17 y 18, y de forma gráfica en la Figura 12. En donde se observa que las variaciones en la formulación modificaron de manera directa la estructura del producto cárnico inicial. Siendo significativas algunas interacciones que se explicaran a continuación.

Cuadro 17. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de chorizo de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
Dureza (N) ^h	1.25	2.97	0.62	-1.55	3.85	-0.12	2.54	-1.23	0.617	0.00
Cohesión ^{c, d, e}	0.84	0.79	0.75	0.71	0.75	0.71	0.73	0.62	0.040	0.06
Elasticidad (mm) ^e	1.16	1.05	1.13	1.08	1.13	1.00	1.13	0.97	0.043	0.05
Gomosidad (N) ^{f, g}	1.60	3.71	1.86	1.21	2.29	1.20	3.22	-1.31	0.613	0.00
Masticabilidad (mJ) ^{f, g}	1.70	4.38	2.84	1.52	2.11	1.18	3.26	-1.40	0.729	0.00

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de tipo de carne ($p < 0.05$).

^d Efecto de tipo de almidón ($p < 0.05$).

^e Efecto de concentración de almidón ($p < 0.05$).

^f Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^g Interacción Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

^h Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

La dureza, entendida como la resistencia del producto a la compresión, mostró diferencias en la formulación tanto para la ordenada al origen como para la pendiente ($p < 0.05$), lo que evidencia que la incorporación de almidones de leguminosas y la condición de la carne modificaron de manera importante el comportamiento textural del sistema cárnico. Estos resultados indican modificaciones en la formación y estabilidad de la red proteína–almidón–agua, afectando la resistencia inicial del producto y el cambio en la dureza durante su almacenamiento.

Como se presenta en el Cuadro 17, los tratamientos PH0 y NH5 presentaron los valores iniciales más altos (3.85 y 2.97), lo que indica una mayor firmeza estructural inicial. Particularmente, en el tratamiento NH5 sugiere una mayor contribución inicial a la firmeza estructural, asociada a la capacidad del almidón de haba para formar matrices más compactas debido a su mayor contenido de amilosa y su capacidad de retención de agua. En contraste, la adición de almidón de lenteja en los tratamientos PL5 y NL5 mostraron menores valores de ordenada, debido a que poseen fracciones de almidón y fibra con diferente capacidad de hidratación respecto al proveniente de haba, lo cual podría indicar una menor eficiencia en la interacción con las proteínas miofibrilares. Este comportamiento se asocia a que el almidón, dependiendo de su grado de gelatinización y capacidad de hidratación, puede actuar como una fase dispersa que diluye la matriz proteica y limita la formación de interacciones proteína-proteína, disminuyendo la resistencia mecánica del sistema (Joshi y col., 2013; Nilsson y col., 2022). Este fenómeno ha sido reportado en sistemas cárnicos reformulados con harinas de leguminosas o cereales, donde se observa una reducción de la firmeza cuando la red proteica no se consolida completamente (Salazar y col., 2021).

De manera similar, la pendiente presentó diferencias significativas entre tratamientos, como se muestra en el Cuadro 18, mientras que la Figura 12 evidenció un incremento progresivo de la dureza durante el almacenamiento. Los tratamientos NH0, NL0 y PL0 presentaron los mayores valores de pendiente, indicando un mayor endurecimiento en comparación con el resto de las formulaciones. Estos resultados indican un incremento de dureza en los sistemas sin adición de almidón, especialmente en carne normal. En esta etapa, la pérdida de humedad y la reorganización de la red proteica adquieren un papel preponderante, favoreciendo la formación de estructuras más compactas y rígidas. La agregación progresiva de proteínas miofibrilares y el fortalecimiento de interacciones intermoleculares incrementan la resistencia del sistema a la deformación, lo que se refleja en mayores valores de dureza. En los tratamientos elaborados con carne PSE, la desnaturalización proteica limitó la capacidad de formación de gel y redujo la rigidez estructural del sistema. En contraste, la mayor integridad de las proteínas miofibrilares en la carne normal favoreció el desarrollo de estructuras más firmes y estables durante el almacenamiento.

En conjunto, la ordenada al origen y la pendiente mostraron una triple interacción significativa, evidenciando que el tipo de carne, el tipo de almidón y su concentración influyeron de manera simultánea sobre la dureza. Este comportamiento indica que el efecto tecnológico de los almidones depende tanto de las características fisicoquímicas de la matriz cárnica como del nivel de incorporación y del origen del almidón. En este sentido, la funcionalidad del almidón no puede interpretarse de forma aislada, debido a que la matriz proteica condiciona fenómenos como la gelatinización, el hinchamiento granular y la capacidad de retención de agua, los cuales determinan la formación y estabilidad de la red estructural del producto (Zhang y col., 2021).

Cuadro 18. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para los parámetros de perfil de textura de chorizo de cerdo.

Variable	Tratamiento ^a								EE ^b	<i>p</i> <
	NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
Dureza (N) ^d	4.39	2.12	3.40	2.17	0.87	2.24	3.39	1.82	0.232	0.00
Cohesión	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.005	0.11
Elasticidad (mm) ^c	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.004	0.02
Gomosidad (N) ^d	2.07	0.98	1.54	1.45	0.96	1.91	1.72	1.36	0.193	0.01
Masticabilidad (mJ) ^d	2.17	1.29	1.35	1.49	1.08	1.86	1.70	1.35	0.217	0.05

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b EE, Error estándar.

^c Efecto de concentración de almidón ($p < 0.05$).

^d Triple interacción Carne*Almidón*Concentración ($p < 0.05$).

Por su parte, la cohesión, asociada con la integridad interna de la matriz y su capacidad para soportar deformaciones sucesivas sin fracturarse, mostró una menor sensibilidad a las formulaciones en comparación con la dureza; sin embargo, se observaron efectos significativos del tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración sobre la ordenada al

origen. Esto sugiere que las formulaciones afectaron principalmente la resistencia a la deformación, más que la integridad de la estructural inicial.

Los resultados en el Cuadro 17 muestran que los valores promedio oscilaron entre 0.62 y 0.84, siendo el tratamiento NH0 el que presentó la mayor cohesión inicial, mientras que el tratamiento PL5 mostró el valor más bajo. Esto sugiere que cuando las proteínas conservan su funcionalidad, es decir cuando se hace uso de carne normal, se establece una estructura más continua y capaz de resistir esfuerzos repetidos. En contraste, la presencia de componentes que interfieren con la red, como el almidón de lenteja, o el uso de proteínas parcialmente desnaturalizadas como en el caso de la carne PSE, puede generar estructuras menos integradas. El análisis factorial confirmó efectos significativos independientes de carne, almidón y concentración sobre la ordenada de cohesión. Sin embargo, la estabilidad observada en el Cuadro 18 durante el almacenamiento sugiere que, una vez formada, la red estructural no sufre cambios importantes en su integridad interna. Esto puede explicarse por una reorganización hacia estructuras más compactas y el fortalecimiento de interacciones intermoleculares, como la formación de puentes disulfuro y el aumento de interacciones hidrofóbicas, que contribuyen a la estabilización de la matriz a lo largo del tiempo (Zhao y col., 2016).

En la elasticidad, definida como la capacidad del sistema para recuperar su forma tras la deformación, mostró que tanto los valores iniciales como el comportamiento durante el almacenamiento estuvieron influenciados por la concentración de almidón en la formulación, reflejando cambios en la organización de la matriz viscoelástica. Esta propiedad depende de la formación de una red de gel de proteínas miofibrilares capaz de integrar eficazmente los gránulos de almidón.

La ordenada al origen de la elasticidad mostró una tendencia a diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$), aunque no detectaron grupos estadísticamente distintos. Con respecto a la pendiente, en el Cuadro 13 se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), evidenciando cambios en la elasticidad durante el almacenamiento. La presencia de carne normal y almidón favoreció la estabilidad de esta propiedad, probablemente debido a su capacidad para retener agua y reducir la movilidad molecular.

Un pH más alto le da a la proteína cargas negativas sustanciales y fortalece eficientemente la repulsión electrostática. La fuerza de repulsión detrás de la formación de la proteína contribuyó a una dispersión de proteína más uniforme y una estructura de gel distribuida uniformemente (Zhao y col., 2016). En contraste, los sistemas sin almidón presentaron una disminución más pronunciada de la elasticidad, sin la capacidad de retención de agua que aportan los polisacáridos, estos sistemas son más susceptibles a la reorganización proteica y a la pérdida de humedad, lo que compromete la flexibilidad de la red miofibrilar. Una red proteica sin componentes que estabilicen el agua tiende a volverse más rígida pero menos capaz de soportar deformaciones reversibles, lo que se traduce en una disminución de la elasticidad (Huang y col., 2026).

La gomosidad, definida como la energía necesaria para desintegrar un alimento semisólido e integrada por la dureza y la cohesión, mostró una marcada respuesta a la formulación observándose el valor más alto en el tratamiento NH5 y el más bajo en el tratamiento PL5. En las condiciones iniciales, como se muestra en el Cuadro 17, los sistemas elaborados con carne normal presentaron valores más elevados, lo que indica una mayor resistencia estructural y una matriz más densa y organizada. La funcionalidad de las proteínas musculares favorece la formación de una red interna más estable y compacta, incrementando la resistencia a la compresión y, en consecuencia, la gomosidad (Mabrouki y col., 2024). En contraste, los sistemas con carne PSE mostraron valores reducidos, reflejando una estructura más débil y con menor capacidad de integración.

Las interacciones significativas carne-concentración y almidón-concentración evidenciaron, por una parte, que el efecto del incremento en el nivel de almidón dependió del estado funcional de las proteínas en la carne y, por otra, que la respuesta varió según el tipo de almidón incorporado. En la carne normal, la mayor capacidad de hidratación y formación de gel permitió una integración más eficiente de los polisacáridos dentro de la matriz proteica, favoreciendo mayores niveles de gomosidad. Asimismo, la interacción entre las proteínas miofibrilares y los polisacáridos promovió la formación de matrices más compactas y continuas, capaces de ofrecer mayor resistencia a la deformación y desintegración. Estos resultados sugieren que la contribución de cada tipo de almidón al desarrollo estructural del sistema dependió tanto de la concentración como de su capacidad de asociación con la red

proteica (Li y col., 2025).

Durante el periodo de almacenamiento, la gomosidad mantuvo una dependencia del tipo de carne, como se presenta en el Cuadro 18, aunque su evolución fue modificada por la incorporación de almidón. El incremento más evidente se observó en el tratamiento NH0, lo que sugiere una mayor capacidad de reorganización estructural y formación de interacciones proteicas en el tiempo. Adicionalmente, la interacción triple significativa indica que la respuesta cinética de esta propiedad no puede explicarse mediante efectos independientes de cada factor, sino por la interacción entre el tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración incorporada, los cuales determinaron el comportamiento estructural del sistema cárnico durante el almacenamiento.

Por otra parte, la masticabilidad, que integra dureza, cohesión y elasticidad, permite interpretar el comportamiento general del sistema frente a la deformación repetida. Los resultados en el Cuadro 17 muestran que esta propiedad sigue una tendencia consistente con las variables de textura individuales. Los valores iniciales más elevados se registraron en los tratamientos NH5, PL0 y NL0, lo que sugiere la formación de matrices viscoelásticas más consistentes y un mayor trabajo mecánico requerido para su desintegración. Estos resultados indican que tanto la funcionalidad proteica como la composición de la formulación influyeron sobre la resistencia mecánica del sistema. Lo que puede explicarse con sus interacciones significativas carne-concentración y almidón-concentración, en particular, el sistema elaborado con carne normal y almidón de haba presentó una tendencia a formar matrices viscoelásticas más consistentes y a requerir un mayor trabajo mecánico para su desintegración.

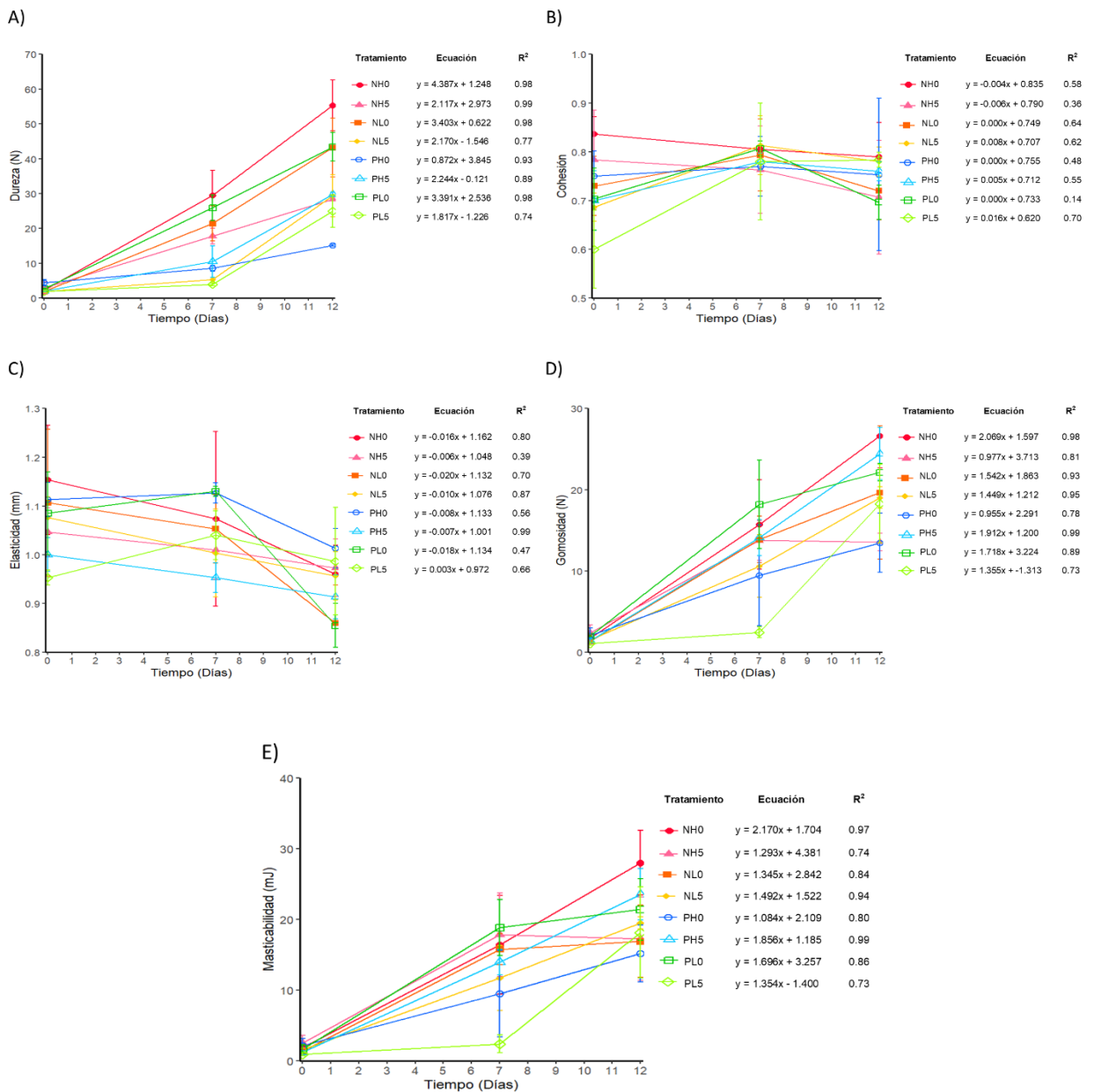


Figura 12. Modelos de regresión lineal. A) cohesión, B) dureza, C) elasticidad, D) gomosidad y E) masticabilidad en chorizos de cerdo. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

Finalmente, la carne PSE en combinación con almidón de lenteja redujo la masticabilidad, lo que sugiere una menor compatibilidad estructural entre las fases proteica y almidón y, por tanto, una matriz menos continua y resistente. Sin embargo, su comportamiento durante el almacenamiento presente en el Cuadro 18 una interacción triple significativa carne-almidón-concentración, indicando que la velocidad de cambio de la masticabilidad durante el almacenamiento dependió de la combinación específica de todos los factores experimentales. El tratamiento NH0 mostraron las mayores pendientes, lo que indica un incremento más acelerado de la masticabilidad a lo largo del almacenamiento, evidenciando la pérdida de humedad y la reorganización progresiva de la red proteica hacia estructuras más compactas.

V.3.3 Oxidación lipídica

La oxidación lipídica en los chorizos fue descrita mediante un modelo de primer orden, estimándose los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente); los resultados se presentan en los Cuadros 19 y 20 y de forma gráfica en la Figura 13. En la etapa inicial, la respuesta estuvo influenciada por la concentración del almidón adicionado, mientras que durante el almacenamiento se observó un efecto asociado al tipo de almidón, el cual moduló el proceso oxidativo a lo largo del tiempo.

Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en los valores iniciales de TBARS, lo que sugiere que la formulación tuvo efecto sobre el grado inicial de oxidación lipídica del sistema. No obstante, conforme avanzó el almacenamiento, los tratamientos mostraron un comportamiento más homogéneo, como se observa en la Figura 13, indicando una tendencia similar en la oxidación.

Cuadro 19. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación lipídica de chorizo de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
0.89	1.33	1.06	1.38	1.04	1.21	1.16	1.26	0.083	0.01

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Efecto de concentración de almidón ($p < 0.05$).

^c EE, Error estándar.

El incremento en los valores iniciales de TBARS observado en los tratamientos NL5 y NH5, correspondientes a sistemas elaborados con carne normal y 5% de almidón de leguminosas, podría estar relacionado con las propiedades funcionales del almidón OSA. Debido a su naturaleza anfifílica, este tipo de almidón favorece la dispersión de la fase lipídica y la formación de emulsiones con mayor área interfacial. En consecuencia, el aumento de la superficie de contacto entre los lípidos, el oxígeno y los catalizadores metálicos puede promover la formación temprana de compuestos secundarios de oxidación lipídica. El análisis factorial confirmó que la concentración tuvo un efecto altamente significativo sobre la ordenada al origen, indicando que el nivel de incorporación del almidón fue un factor determinante en la oxidación inicial del producto. En este sentido, el almidón OSA parece modificar el entorno donde se desarrollan las reacciones oxidativas, facilitando la interacción entre los componentes susceptibles a oxidación (Ding y col., 2025).

Cuadro 20. Pendiente del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación lipídica de chorizo de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
0.05	0.04	0.02	0.03	0.05	0.06	0.03	0.03	0.012	0.32

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Efecto de tipo de almidón ($p < 0.05$).

^c EE, Error estándar.

Una vez iniciado el proceso oxidativo, la acumulación de compuestos secundarios fue similar entre tratamientos observado en el Cuadro 20, además no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos lo que sugiere una evolución similar de la oxidación en las distintas formulaciones.

Lo anterior implica que, la fase de propagación de la oxidación parece haber estado dominada por factores propios del sistema cárnico, como la disponibilidad de ácidos grasos poliinsaturados, la presencia de hierro catalítico y el oxígeno disuelto, los cuales no fueron modificados significativamente por la formulación (Reitznerová y col., 2017). No obstante, en la Figura 13 se observa una tendencia consistente al incremento de la oxidación lipídica a lo largo del almacenamiento, lo cual es consistente con la progresión natural de la peroxidación lipídica en sistemas cárnicos, donde se acumulan compuestos secundarios conforme avanza el almacenamiento (Reitznerová y col., 2017). Este comportamiento coincide con lo reportado por González-Mendoza y col. (2019), quienes observaron un aumento progresivo de los valores de TBARS en productos cárnicos durante el almacenamiento.

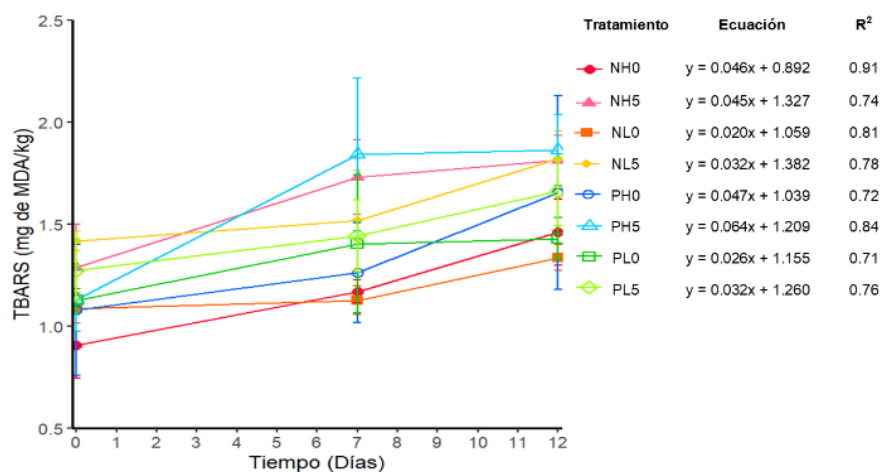


Figura 13. Modelos de regresión lineal para TBARS en chorizos de cerdo elaborados con carne normal y PSE, con y sin adición de almidón de haba y lenteja 0 y 5%. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

V.3.4 Oxidación proteica

La oxidación proteica en los chorizos se describió mediante un modelo de primer orden, estimándose los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente); los resultados se presentan en los Cuadros 21 y 22 y de forma gráfica en la Figura 13. En conjunto, los resultados indican que el comportamiento del sistema está determinado principalmente por su evolución durante el almacenamiento, más que por diferencias iniciales entre tratamientos. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre formulaciones al inicio, lo que indica que las condiciones de partida son comparables desde el punto de vista estadístico.

Cuadro 21. Ordenadas al origen del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de chorizo de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
73.04	54.77	61.30	59.35	57.50	77.28	59.12	75.41	5.633	0.06

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^c EE, Error estándar.

En conjunto, la ausencia de diferencias significativas en las ordenadas al origen ($p = 0.06$) sugiere que no existen efectos principales marcados en las condiciones iniciales de oxidación proteica; sin embargo, la presencia de una interacción significativa entre tipo de carne y concentración indica que la formulación modula el nivel inicial de oxidación de manera dependiente de la matriz cárnica. En este contexto, los tratamientos elaborados con carne PSE presentaron valores más elevados en comparación con carne normal, particularmente a mayor concentración de almidón. Esto sugiere que la condición estructural de la carne influye en la susceptibilidad inicial del sistema, presenta una mayor tendencia a la oxidación, lo cual se asocia con su mayor grado de desnaturalización proteica, menor capacidad de retención de agua y posible liberación de hierro pro-oxidante (Falowo y col., 2014).

Cuadro 22. Pendientes del modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(\text{tiempo})$ para oxidación proteica de chorizo de cerdo.

Tratamiento ^{a, b}								EE ^c	<i>p</i> <
NH0	NH5	NL0	NL5	PH0	PH5	PL0	PL5		
-3.24	-3.55	-2.66	-3.62	-1.08	-4.53	-2.32	-3.75	0.516	0.01

^a NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%.

^b Interacción Carne*Concentración ($p < 0.05$).

^c EE, Error estándar.

El Cuadro 22 muestra que, durante el almacenamiento, los compuestos detectados disminuyeron; sin embargo, esto no implica necesariamente una reducción en la intensidad del proceso oxidativo. En realidad, indica que los productos iniciales de la oxidación están pasando de transformaciones químicas hacia estructuras más estables o complejas, que ya no son cuantificables mediante el método analítico utilizado. Los carbonilos formados durante la oxidación proteica son altamente reactivos y pueden participar en reacciones secundarias como la formación de bases de Schiff, entrecruzamientos proteicos y agregados insolubles, lo que reduce su cuantificación mediante DNPH (Estévez, 2011).

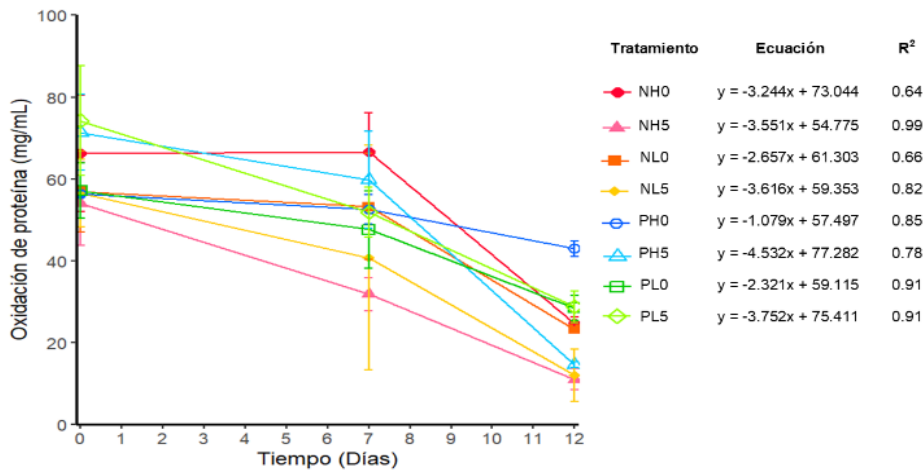


Figura 14. Modelos de regresión lineal para Oxidación de proteína en chorizos de cerdo elaborados con carne normal y PSE, con y sin adición de almidón de haba y lenteja 0 y 5%. Tratamientos, NH0 y NH5: carne normal con almidón de haba al 0 y 5%, respectivamente; NL0 y NL5: carne normal con almidón de lenteja al 0 y 5%; PH0 y PH5: carne PSE con almidón de haba al 0 y 5%; PL0 y PL5: carne PSE con almidón de lenteja al 0 y 5%. Los datos se expresan como media (n = 3).

Adicionalmente la interacción observada durante el almacenamiento entre el tipo de carne y la concentración sugiere que el impacto de los ingredientes de leguminosas sobre las propiedades del producto estuvo mediado por el estado funcional de las proteínas miofibrilares de cada tipo de carne. Los almidones contribuyen a modificar la microestructura del sistema, aumentando la viscosidad y favoreciendo una redistribución del agua, lo que limita la movilidad de especies reactivas. Simultáneamente, los compuestos fenólicos, flavonoides y ácido fítico presentes en haba y lenteja ejercen efectos

antioxidantes mediante la captura de radicales libres y la quelación de metales de transición, reduciendo la formación de especies altamente reactivas (Miao y col., 2025). En el caso específico de la carne PSE, aunque su estructura favorece teóricamente procesos oxidativos, su interacción con los componentes de la formulación puede modificar la cinética del sistema.

VI. CONCLUSIONES

Se logró la modificación de los almidones de haba (*Vicia faba L.*) y lenteja (*Lens culinaris*) mediante extrusión reactiva con anhídrido octenil succínico (OSA). Esta modificación fue corroborada mediante microscopía electrónica de barrido, que evidenció cambios en la estructura granular de los almidones; espectroscopía infrarroja (FTIR), que confirmó la incorporación de grupos octenil succinato; y el análisis del perfil de viscosidad, que mostró modificaciones en sus propiedades funcionales, confirmando la efectividad del proceso de modificación.

La incorporación de los almidones modificados en jamón y chorizo elaborados con carne normal y carne PSE influyó significativamente en las propiedades fisicoquímicas y de textura de ambos productos. El tipo de carne, el tipo de almidón y la concentración de incorporación modificaron el comportamiento del pH, el color, la textura y la evolución de la oxidación durante el almacenamiento, evidenciando que la respuesta dependió de la interacción entre estos factores. En el jamón, el almidón de haba mostró una tendencia a favorecer estructuras más firmes, mientras que el almidón de lenteja presentó matrices menos compactas y de menor resistencia mecánica, especialmente en las formulaciones elaboradas con carne PSE. Asimismo, en chorizo se observaron modificaciones en las propiedades fisicoquímicas y texturales durante el almacenamiento, aunque la magnitud de los cambios dependió de la formulación evaluada.

En conjunto, los resultados demuestran que los almidones modificados de haba y lenteja constituyen ingredientes funcionales con potencial para su aplicación en productos cárnicos elaborados con carne PSE. Su incorporación permitió modificar las propiedades fisicoquímicas, texturales y la evolución de los procesos de oxidación durante el almacenamiento, contribuyendo al aprovechamiento tecnológico de una materia prima con menor funcionalidad. Además, las diferencias observadas entre ambos almidones indican que su uso se puede realizar en función de las características tecnológicas requeridas en el producto final, ya que el almidón de haba favoreció una mayor firmeza estructural, mientras que el almidón de lenteja generó matrices menos compactas. Estos hallazgos demuestran que la modificación de almidones de leguminosas mediante extrusión reactiva

representa una estrategia viable para desarrollar ingredientes funcionales destinados a productos cárnicos elaborados con materias primas de distinta calidad tecnológica, promoviendo el aprovechamiento de carne PSE y el uso de ingredientes de origen vegetal con valor agregado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Altuna, L., Herrera, M. L., & Foresti, M. L. (2018). Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications: A review of recent literature. *Food Hydrocolloids*, 80, 97–110.

American Association of Cereal Chemists. (1999). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists (11th ed., Method 61-02). AACC International.

American Meat Science Association. (2012). AMSA meat color measurement guidelines.

Barbut, S., Sosnicki, A. A., Lonergan, S. M., Knapp, P. O., Ciobanu, D. C., Gatcliffe, L. J., Huff-Lonergan, E., & Wilson, E. W. (2008). Progress in reducing the pale, soft and exudative (PSE) problem in pork and poultry meat. *Meat Science*, 79(1), 46–63.

Barragán-Martínez, L. P., Totosaus, A., & De Lourdes Pérez-Chabela, M. (2019). Probiotication of cooked sausages employing agroindustrial coproducts as prebiotic co-encapsulant in ionotropic alginate–pectin gels. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(3), 1088–1096.

Bekhit, A. E. A., Holman, B. W., Giteru, S. G., & Hopkins, D. L. (2021). Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 280–302.

Boland, M., Kaur, L., Chian, F. M., & Astruc, T. (2019). Muscle proteins. En L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 164–179). Elsevier.

Bourne, M. C. (1978). Texture profile analysis. *Food Technology*, 32(7), 62–66, 72.

Bourne, M. C. (2002). *Food texture and viscosity: Concept and measurement* (2nd ed.). Academic Press.

Burnett, D. D., Legako, J. F., Phelps, K. J., & Gonzalez, J. M. (2020). Biology, strategies, and fresh meat consequences of manipulating the fatty acid composition of meat. *Journal of Animal Science*, 98(2).

Li, X., Fu, X., Yang, G., Du, M., & Gao, P. (2020). Enhancing intramuscular fat development via targeting fibro-adipogenic progenitor cells in meat animals. *Animal*, 14(2), 312–321.

Cai, C., Wei, B., Tian, Y., Ma, R., Chen, L., Qiu, R., & Jin, Z. (2019). Structural changes of chemically modified rice starch by one-step reactive extrusion. *Food Chemistry*, 288, 354–360.

Campagnol, P. C. B., Lorenzo, J. M., Santos, B. D., & Cichoski, A. J. (2022). Recent advances in the development of healthier meat products. *Advances in Food and Nutrition Research*, 123–179.

Carvalho, H. J. M., Barcia, M. T., & Schmiele, M. (2024). Non-conventional starches: Properties and potential applications in food and non-food products. *Macromol*, 4(4), 886–909.

Carvalho, R. H., Ida, E. I., Madruga, M. S., Martínez, S. L., Shimokomaki, M., & Estévez, M. (2016). Underlying connections between the redox system imbalance, protein oxidation and impaired quality traits in pale, soft and exudative (PSE) poultry meat. *Food Chemistry*, 215, 129–137.

Compart, J., Singh, A., Fettke, J., & Apriyanto, A. (2023). Customizing starch properties: A review of starch modifications and their applications. *Polymers*, 15(16), 3491.

Consejo Mexicano de la Carne. (2025). Compendio estadístico 2024. Recuperado el 8 de junio de 2026 de: <https://comecarne.org/compendio-estadistico-2025/>

Ding, Y., Shen, Z., Ding, Y., & Xu, Y. (2025). Effects of octenyl succinic anhydride (OSA) starches with different amylose content on freeze-thaw stability of myofibrillar

protein emulsion gel: Double enhancement of interfacial film and network structure. *Food Hydrocolloids*, 163, 111110.

Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., & Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), 429.

Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Science*, 89(3), 259–279.

Eusse, J. (2008). *La carne de cerdo: Guía práctica para su comercialización*. Asociación Americana de Soya.

Falowo, A. B., Fayemi, P. O., & Muchenje, V. (2014). Natural antioxidants against lipid–protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 64, 171–181.

Fernández, L., & López, J. (2004). Application of functional ingredients in meat products. *Meat Science*, 67, 451–457.

Gautam, G., Talukdar, D., & Mahanta, C. L. (2023). Sonochemical effect on the degree of substitution of octenyl-succinic anhydride into waxy rice starch nanoparticles and study of gastro-intestinal hydrolysis using INFOGEST in vitro digestion method. *Food Research International*, 165, 112348.

Goemaere, O., Glorieux, S., Govaert, M., Steen, L., & Fraeye, I. (2021). Phosphate elimination in emulsified meat products: Impact of protein-based ingredients on quality characteristics. *Foods*, 10(4), 882.

González-Mendoza, M. E., Martínez-Bustos, F., Castaño-Tostado, E., Cortez-Trejo, M. del C., & Amaya-Llano, S. L. (2025). Microwave-assisted OSA–faba bean starch production for probiotic microencapsulation. *Polysaccharides*, 6(3), 81.

Gorbach, S., Doron, S., & Magro, F. (2017). *The microbiota in gastrointestinal pathophysiology*. Academic Press.

- Gutiérrez-Chocoza, M. A., López-Romero, J. C., García-Galaz, A., González-Ríos, H., Peña-Ramos, A., Juneja, V. K., Pérez-Báez, A. J., & Valenzuela-Melendres, M. (2023). Modeling the effects of temperature and pH on *Listeria monocytogenes* growth in Mexican-style pork chorizo. *Applied Food Research*, 3(2), 100336.
- Haddad, G. D. B. S., Moura, A. P. R., Fontes, P. R., da Cunha, S. F. V., Ramos, A. L. S., & Ramos, E. M. (2018). The effects of sodium chloride and PSE meat on restructured cured-smoked pork loin quality: A response surface methodology study. *Meat Science*, 137, 191–200.
- Hamm, R. (1960). Biochemistry of meat hydration. *Advances in Food Research*, 10, 355–463.
- Han, J., Wang, Y., Wang, Y., Hao, S., Zhang, K., Tian, J., & Jin, Y. (2024). Effect of changes in the structure of myoglobin on the color of meat products. *Food Materials Research*, 4(1).
- Herrero, A. M., de la Hoz, L., Ordóñez, J. A., Herranz, B., Romero de Ávila, M. D., & Cambero, M. I. (2008). Tensile properties of cooked meat sausages and their correlation with texture profile analysis parameters and physico-chemical characteristics. *Meat Science*, 80(3), 690–696.
- Honikel, K. O., & Kim, C. J. (1986). Causes of the development of the PSE pork. *Fleischwirtschaft*, 63, 349.
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Alvarez-Ramirez, J., & García, H. S. (2016). Microencapsulation using starch as wall material: A review. *Food Reviews International*, 34(2), 148–161.
- Huang, J., Quan, W., Lou, A., Luo, J., Fan, X., Shen, Q., & Zhou, L. (2026). Applying polysaccharides to enhance the quality of protein-based emulsion gels: A comprehensive review. *Journal of Future Foods*.
- Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S., & Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch

molecular degradation, order–disorder structural transition and digestibility: A review. *Foods*, 11(16), 2538.

Hughes, J. M., Øiseth, S. K., Purslow, P. P., & Warner, R. D. (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98(3), 520–532.

Joshi, M., Aldred, P., Panozzo, J., Kasapis, S., & Adhikari, B. (2013). Rheological and microstructural characteristics of lentil starch–lentil protein composite pastes and gels. *Food Hydrocolloids*, 35, 226–237.

Kweon, D. K., Song, S. B., & Park, K. H. (2001). A new method to determine the degree of substitution of carboxymethyl starch. *Starch/Stärke*, 53(7), 331–335.

Mabrouki, S., Abid, K., Kaihara, H., Patrucco, S. G., Tassone, S., & Barbera, S. (2024). Assessing texture profile analysis in natural state versus texture profile analysis with back extrusion post-homogenization of cooked pea protein-based and meat patties: A comparative study. *Future Foods*, 9, 100345.

Makroo, H., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. N. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, 1(1), 100001.

Mancini, R. A., & Hunt, M. C. (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71(1), 100–121.

Marim, B. M., Mantovan, J., Gil-Giraldo, G. A., Pereira, J. F., Simões, B. M., Yamashita, F., & Mali, S. (2022). Reactive extrusion-assisted process to obtain starch hydrogels through reaction with organic acids. *Polysaccharides*, 3(4), 792–803.

Martínez, O., Lapo, B., Pérez, J., Zambrano, C., & Maza, F. (2015). Gelatinization mechanism of exportable banana native starch of Ecuador. *Revista Colombiana de Química*, 44, 16–21.

Martínez-Zamora, L., Peñalver, R., Ros, G., & Nieto, G. (2020). Substitution of

synthetic nitrates and antioxidants by spices, fruits and vegetables in clean label Spanish chorizo. *Food Research International*, 139, 109835.

Mashood, Q., Karlsson, A. H., Wallenbeck, A., Eriksson, S., Johansson, A. M., & Segerkvist, K. A. (2024). A review on pale, soft, and exudative (PSE)-like zones in pork: Current knowledge on underlying factors and identification of knowledge gaps for further research. *Acta Agriculturae Scandinavica Section A – Animal Science*, 73(3–4), 203–212.

Miao, X., Hastie, M., Ha, M., Shand, P. J., & Warner, R. D. (2025). Faba bean protein reduces lipid oxidation and changes physicochemical quality traits of hybrid beef burgers stored in high oxygen and high nitrogen modified atmosphere packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 47, 101429.

Mira, M. (2009). *Compendio de ciencia y tecnología de la carne*. AASI.

Mustedanagic, A., Schrattecker, A., Dzieciol, M., Tichy, A., Thalguter, S., Wagner, M., & Stessl, B. (2023). Characterization of *Leuconostoc carnosum* and *Lactobacillus sakei* during cooked pork ham processing. *Foods*, 12(13), 2475.

Muyulema, R. (2012). *Estudio integral de la calidad de la carne de cerdo (criollo, mestizo y Yorkshire) y su influencia sobre la industrialización como jamón (Tesis de maestría)*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Nahar, N., Rahman, M. H., Hazra, S., & Ahmed, J. (2024). Structural and pasting properties of lentil starch: A comprehensive review. *Legume Science*, 6(4).

Narvárez-González, E. D., Bello-Pérez, L. A., & Flores-Farías, R. (2007). Effect of calcium salts in the presence of hydrocolloids on the thermal, rheological, and textural properties of nixtamalized corn flour. *Cereal Chemistry*, 84(3), 276–280.

Nilsson, K., Sandström, C., Özeren, H. D., Vilaplana, F., Hedenqvist, M., & Langton, M. (2022). Physicochemical and thermal characterisation of faba bean starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(6), 4470–4485.

Offer, G., & Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: The swelling and shrinking of the myofibrils. *Meat Science*, 8, 245–281.

Ovando-Martínez, M., Whitney, K., Ozsisli, B., & Simsek, S. (2017). Physicochemical properties of octenyl succinic esters of cereal, tuber and root starches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1).

Punia, S., Dhull, S. B., Sandhu, K. S., & Kaur, M. (2019). Faba bean (*Vicia faba*) starch: Structure, properties, and in vitro digestibility—A review. *Legume Science*, 1(1).

Raharjo, S., & Sofos, J. N. (1993). Methodology for measuring malonaldehyde as a product of lipid peroxidation in muscle tissues: A review. *Meat Science*, 35(2), 145–169.

Reitznerová, A., Šuleková, M., Nagy, J., Marcinčák, S., Semjon, B., Čertík, M., & Klempová, T. (2017). Lipid peroxidation process in meat and meat products: A comparison study of malondialdehyde determination between modified 2-thiobarbituric acid spectrophotometric method and reverse-phase high-performance liquid chromatography. *Molecules*, 22(11), 1988.

Ren, N., Hu, X., & Ma, Z. (2023). Multi-scale structural insights into enzymatically hydrolyzed lentil starch concentrates prepared by in vitro method using different types of enzymes. *Foods*, 12(11), 2150.

Resconi, V. C., Keenan, D. F., García, E., Allen, P., Kerry, J. P., & Hamill, R. M. (2016). The effects of potato and rice starch as substitutes for phosphate and degree of comminution on the technological, instrumental and sensory characteristics of restructured ham. *Meat Science*, 121, 127–134.

Rezler, R. (2022). The role of starch in shaping the rheo-mechanical properties of fat-in-water emulsions. *Polysaccharides*, 3(4), 804–817.

Rodríguez-González, M., Purriños, L., Martínez, S., & Carballo, J. (2025). Spices

affect the biochemical events taking place during the manufacture of Galician chorizo sausage. *LWT*, 117322.

Salazar, D., Arancibia, M., Raza, K., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2021). Influence of underutilized unripe banana (Cavendish) flour in the formulation of healthier chorizo. *Foods*, 10(7), 1486.

Secretaría de Economía. (2003). NOM-158-SCFI-2003, Productos cárnicos procesados—Jamón cocido—Especificaciones. *Diario Oficial de la Federación*.

Simsek, S., Ovando-Martinez, M., Marefati, A., Sjöö, M., & Rayner, M. (2015). Chemical composition, digestibility and emulsification properties of octenyl succinic esters of various starches. *Food Research International*, 75, 41–49.

Suman, S. P., & Joseph, P. (2013). Myoglobin chemistry and meat color. *Annual Review of Food Science and Technology*, 4, 79–99.

Swatland, H. J. (1992). Paleness, softness and exudation in pork. En E. Puolanne, D. J. Demeyer, M. Ruusunen, & S. Ellis (Eds.), *Pork quality: Genetic and metabolic factors* (pp. 273–285). CAB International.

Szczesniak, A. S. (1963). Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*, 28(4), 385–389.

Thangavelu, K. P., Kerry, J. P., Tiwari, B. K., & McDonnell, C. K. (2019). Novel processing technologies and ingredient strategies for the reduction of phosphate additives in processed meat. *Trends in Food Science & Technology*, 94, 43–53.

Tian, Y., Zhang, X., Sun, B., Jin, Z., & Wu, S. (2015). Starch sodium dodecyl succinate prepared by one-step extrusion and its properties. *Carbohydrate Polymers*, 133, 90–93.

Toldrá, F., Mora, L., & Flores, M. (2010). Cooked ham. En F. Toldrá (Ed.), *Handbook of meat processing* (pp. 299–311). Wiley-Blackwell.

Tong, F., Deng, L., Sun, R., & Zhong, G. (2019). Effect of octenyl succinic anhydride starch ester by semi-dry method with vacuum-microwave assistant. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141, 1128–1136.

Varga-Visi, É., & Toxanbayeva, B. (2017). Application of fat replacers and their effect on quality of comminuted meat products with low lipid content: A review. *Acta Alimentaria*, 46, 181–186.

Voisey, P. W. (1975). Applications of the Ottawa Texture Measuring System. *Journal of Texture Studies*, 6(1), 96–101.

Wismer-Pedersen, J. (1986). Agua. En J. F. Price & B. S. Schweigert (Eds.), *La ciencia de la carne y de los productos cárnicos*. Acribia.

Xargayo, M., & Lagares, J. (2008). Rentabilidad de las líneas de fabricación de jamón cocido: Adaptación a diferentes ciclos de maduración. *Eurocarne*, 172, 56–62.

Xiong, Y. L. (2005). Role of myofibrillar proteins in meat emulsions. *Journal of Food Science*, 70(3), R53–R63.

Ye, J., Luo, S., Huang, A., Chen, J., Liu, C., & McClements, D. J. (2019). Synthesis and characterization of citric acid esterified rice starch by reactive extrusion: A new method of producing resistant starch. *Food Hydrocolloids*, 92, 135–142.

Zhang, B., Qiao, D., Zhao, S., Lin, Q., Wang, J., & Xie, F. (2021). Starch-based food matrices containing protein: Recent understanding of morphology, structure, and properties. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 212–231.

Zhang, W., Cheng, B., Li, J., Shu, Z., Wang, P., & Zeng, X. (2021). Structure and properties of octenyl succinic anhydride-modified high-amylose Japonica rice starches. *Polymers*, 13(8), 1325.

Zhao, X., Xing, T., Chen, X., Han, M., Li, X., Xu, X., & Zhou, G. (2016). Precipitation and ultimate pH effect on chemical and gelation properties of protein prepared by isoelectric solubilization/precipitation process from pale, soft, exudative (PSE)-like

chicken breast meat. *Poultry Science*, 96(5), 1504–1512.

Zhou, F., Dong, M., Huang, J., Lin, G., Liang, J., Deng, S., Gu, C., & Yang, Q. (2023). Preparation and physico-chemical characterization of OSA-modified starches from different botanical origins and study on the properties of Pickering emulsions stabilized by these starches. *Polymers*, 15(3), 706.