

Cinética de secado de carne bovina DFD pretratada con salmuera antioxidante

Drying kinetics of DFD beef that was pretreated with antioxidant brine

Loguard Smith Rojas Uribe ^{1,*}, Abelardo Jerónimo Alderete Rendon ², Angel Virgilio Cedeño Moreira ³ y Yomber José Montilla López ⁴

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Los Ríos; <https://orcid.org/0000-0001-8971-0292>

²Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Los Ríos; <https://orcid.org/0000-0002-8456-4297>; aaldereter@uteq.edu.ec

³Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Los Ríos; <https://orcid.org/0000-0002-6564-5569>; acedenom@uteq.edu.ec

⁴Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Los Ríos; <https://orcid.org/0000-0002-8592-248X>; yMontilla@uteq.edu.ec

* Correspondencia: lrojas@uteq.edu.ec

Cita: Rojas Uribe, L. S., Alderete Rendon, A. J., Cedeño Moreira, A. V., & Montilla López, Y. J. (2025). Cinética de secado de carne bovina DFD pretratada con salmuera antioxidante. *Horizon Nexus Journal*, 3(3), 16-32. <https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n3/82>

Recibido: 27/05/2025
Revisado: 05/07/2025
Aceptado: 15/07/2025
Publicado: 31/07/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución- NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

 <https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n3/82>

Resumen: La carne bovina DFD (oscura, firme y seca) presenta características que comprometen su calidad comercial y microbiológica. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la cinética de secado de carne DFD previamente tratada mediante inmersión en salmuera antioxidante, como estrategia para mejorar su estabilidad y valor agregado. Se aplicó un diseño factorial 3x2x2, considerando tres temperaturas de secado (110, 115 y 120 °C), dos tiempos de inmersión (1 y 2 h) y dos concentraciones de ácido ascórbico (1 % y 1,5 %). Los parámetros cinéticos fueron ajustados mediante los modelos matemáticos de Fick y Page. El modelo de Page mostró mejor desempeño en todos los tratamientos ($R^2 > 0,995$), con menores residuos y valores de χ^2_{red} , reflejando mayor precisión predictiva. Se observó que el aumento de temperatura y concentración antioxidante elevó significativamente tanto el coeficiente de difusión efectiva ($Deff$) como la constante de secado (k). Los análisis fisicoquímicos indicaron productos con >25 % de proteína, pH >6,0 y $aw < 0,85$; mientras que los análisis microbiológicos confirmaron la ausencia de *Salmonella spp.* y *E. coli*. El análisis sensorial reflejó alta aceptabilidad. Se concluye que la combinación de inmersión en salmuera antioxidante y secado convectivo es una alternativa eficaz para valorizar carne DFD.

Palabras clave: Carne DFD; cinética de secado; salmuera antioxidante; modelo de Page; calidad microbiológica

Abstract: DFD beef (dark, firm and dry) has characteristics that compromise its commercial and microbiological quality. The objective of this study was to evaluate the drying kinetics of DFD meat previously treated by immersion in antioxidant brine, as a strategy to improve its stability and added value. A 3x2x2 factorial design was applied, considering three drying temperatures (110, 115 and 120 °C), two immersion times (1 and 2 h) and two ascorbic acid concentrations (1 % and 1.5 %). The kinetic parameters were adjusted using the mathematical models of Fick and Page. The Page model showed better performance in all treatments ($R^2 > 0.995$), with lower residuals and χ^2_{red} values, reflecting higher predictive accuracy. It was observed that increasing temperature and antioxidant concentration significantly raised both the effective diffusion coefficient ($Deff$) and the drying constant (k). Physicochemical analysis indicated products with >25 % protein, pH >6.0 and $aw < 0.85$; while microbiological analysis confirmed the absence of *Salmonella spp.* and *E. coli*. The sensory analysis reflected high acceptability. It is concluded that the combination of immersion in antioxidant brine and convective drying is an effective alternative to valorize DFD beef.

E. coli. Sensory analysis reflected high acceptability. It is concluded that the combination of immersion in antioxidant brine and convective drying is an effective alternative to valorize DFD meat.

Keywords: DFD meat; drying kinetics; antioxidant brine; Page's model; microbiological quality

1. Introducción

La carne bovina tipo DFD (Dark, Firm, Dry) representa un importante problema de calidad en la industria cárnica, especialmente en América Latina, donde prácticas inadecuadas de manejo ante mortem están directamente relacionadas con su aparición (Adzitey & Nurul, 2011; Loredo-Osti et al., 2021; Pérez-Linares et al., 2015). Según estudios realizados en plantas de sacrificio con inspección federal (TIF), se ha reportado que entre el 10 % y el 20 % de las canales presentan características DFD, lo que genera pérdidas económicas significativas debido al rechazo comercial, necesidad de procesamiento secundario y deterioro acelerado (Leyva-García et al., 2012). Esta condición, caracterizada por un pH final > 6.0, se traduce en una carne de color oscuro, firme, con escasa capacidad de retención de agua y propensa a oxidación microbiana, comprometiendo su vida útil, aceptabilidad sensorial y seguridad alimentaria (FSIS, 2021; Rahman, 2023; Mediani et al., 2022).

Con el fin de valorizar este tipo de carne y reducir las pérdidas postcosecha, diversas investigaciones han enfocado sus esfuerzos en el uso de soluciones salinas antioxidantes. El ácido ascórbico, en particular, ha demostrado alta eficacia como agente estabilizante del color y reductor de la oxidación lipídica (Ahn & Nam, 2004; Mancini & Hunt, 2004; Mancini et al., 2007a; Mancini et al., 2007b). Su acción se fundamenta en la reducción de la metamioglobina a mioglobina y en la inhibición de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que favorece la retención del color rojo brillante en carnes de pH elevado y protege contra el deterioro oxidativo (Choi et al., 2008; Kim et al., 2022). Comparado con otros antioxidantes como el eritorbato de sodio, el ácido ascórbico ha mostrado mayor eficacia cuando se combina con técnicas de secado por calor o vacío, incrementando además la aceptabilidad sensorial del producto final (Mancini et al., 2007a, Kim et al., 2022).

En lo que respecta al modelado del proceso de secado, el modelo empírico de Page ha sido ampliamente validado en productos cárnicos de estructura anisotrópica y alto contenido proteico, como filetes de res o jamón curado. Diversos estudios lo han empleado con éxito para describir la cinética de pérdida de humedad, obteniendo coeficientes de determinación superiores a los de modelos clásicos como Newton, Lewis o Henderson & Pabis (Kucuk et al., 2014; Mewa et al., 2018; Giraldo-Zúñiga et al., 2010). Esto se debe a su capacidad para incorporar un parámetro adicional que ajusta las variaciones no lineales del proceso, especialmente cuando intervienen fenómenos de contracción estructural o difusión limitada.

La transformación de carne DFD en productos tipo jerky o carne deshidratada representa una alternativa industrial de alto valor agregado. Este tipo de alimentos presenta larga vida útil, elevada concentración de proteínas, buena aceptabilidad sensorial y bajo riesgo microbiológico si se controlan parámetros como la actividad de agua (*aw*), lo que permite su comercialización sin refrigeración (CODEX, 2022; FSIS, 2014). La tendencia hacia el consumo de snacks proteicos funcionales, con buen perfil nutricional y sensorial, refuerza la viabilidad industrial de este enfoque, especialmente en mercados especializados (Comaposada et al., 2009; Mediani et al., 2022).

En este marco, la presente investigación contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 12, que promueve la producción y el consumo responsable mediante la valorización de subproductos cárnicos, y el ODS 9, que fomenta la innovación y la infraestructura industrial. Al desarrollar soluciones tecnológicas aplicables en la agroindustria cárnica, se impulsa la eficiencia de la cadena de valor y se reduce el impacto ambiental del desperdicio alimentario.

2. Materiales y Métodos

2.1 Tipo y diseño de investigación

Se llevó a cabo una investigación aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño experimental completamente aleatorizado con estructura factorial 3×2×2. Los factores evaluados fueron: temperatura de secado (110, 115 y 120 °C), tiempo de inmersión en salmuera (1 y 2 horas) y concentración de ácido ascórbico en la salmuera (1 % y 1,5 %). El diseño permitió estudiar los efectos individuales y combinados de estos factores sobre la cinética de secado de carne bovina DFD, replicando metodologías similares a las descritas por Bampi et al. (2019) y Mewa et al. (2018).

2.2 Selección de muestras y consideraciones éticas

Se utilizaron muestras del músculo *semimembranoso* de ganado bovino DFD, recolectadas a las 24 horas post mortem. Se seleccionaron cortes con pH superior a 6,0, color oscuro, consistencia firme y baja exudación, cumpliendo con los criterios de clasificación DFD. Las muestras se obtuvieron en un establecimiento autorizado, y el proyecto contó con aprobación del comité técnico-científico de la institución ejecutora. No se incluyeron muestras con evidencia de descomposición ni alteración microbiológica.

2.3 Preparación de las muestras

Las piezas fueron desgrasadas manualmente y cortadas en láminas rectangulares de 5 mm de espesor y 27 cm² de área superficial (6 × 4,5 cm), siguiendo las recomendaciones de Giraldo-Zúñiga et al. (2010). Las muestras fueron divididas aleatoriamente en los 12 tratamientos definidos por el diseño factorial.

2.4 Formulación de salmueras antioxidantes

Se formularon dos soluciones salinas con diferentes concentraciones de aditivos funcionales. La primera contenía 1,0 % de ácido ascórbico, tripolifosfato de sodio y nitrito de sodio, junto con 3,5 g de sal común disueltos en 100 mL de agua destilada. La segunda formulación replicó la composición, pero con 1,5 % de cada uno de los aditivos. Las mezclas fueron preparadas a 40 °C bajo agitación constante hasta obtener soluciones homogéneas, libres de sedimentos. Luego se dejaron reposar hasta alcanzar temperatura ambiente. Las muestras cárnicas fueron sumergidas completamente en las soluciones, manteniendo una proporción carne/líquido de 1:4, durante 1 o 2 horas según el tratamiento experimental, en refrigeración. Posteriormente, fueron escurridas por 5 minutos a 25 °C para eliminar el exceso superficial.

2.5 Secado térmico convectivo

Las muestras escurridas fueron colocadas sobre bandejas perforadas y llevadas a una estufa de convección forzada modelo Memmert UF55, equipada con sistema de recirculación de aire y control de temperatura, programada a 110, 115 o 120 °C con velocidad de flujo de aire constante de 0,0139 m³/s. Se registró la masa de las muestras cada 20 minutos con balanza

analítica ($\pm 0,001$ g) hasta alcanzar peso constante (< 10 % de humedad final), como lo sugiere Mediani et al. (2022).

2.6 Cálculo de la relación de humedad

A partir de los datos experimentales obtenidos (peso vs. tiempo), se calculó la relación de humedad (MR, moisture ratio) adimensional mediante la siguiente ecuación (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M_t = Masa en el tiempo t , M_0 = Masa inicial ($t = 0$), M_e = Masa en equilibrio (último valor registrado, asumido como peso constante).

2.7 Ajuste a modelos matemáticos de secado

Las curvas experimentales de relación de humedad (MR) fueron ajustadas utilizando el modelo difusivo de Fick para lámina plana y el modelo empírico de Page, siguiendo la metodología descrita por Mewa et al. (2018), quienes aplicaron estos modelos al análisis cinético del secado de carne de res.:

1. Modelo difusivo (Ley de Fick simplificada): Se aplicó la solución analítica de la segunda ley de Fick para régimen difusivo no estacionario, utilizando una geometría de placa plana, considerando únicamente el primer término de la serie infinita, el cual fue calculado según la ecuación (2):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)} \quad (2)$$

Donde D_{eff} es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s), L es la mitad del espesor de la muestra ($0,005$ m o $0,5$ cm). El valor de D_{eff} fue estimado mediante regresión lineal a partir del gráfico de $\ln(MR)$ vs. tiempo, usando la pendiente obtenida en la etapa inicial del secado (donde predomina la difusión).

2. Modelo empírico de Page: Se ajustaron los datos experimentales al modelo de Page expresado por la ecuación (3):

$$MR = \exp(-k t^n) \quad (3)$$

Donde k es la constante de secado (min^{-1}), n es el exponente empírico del modelo (adimensional). Estos parámetros (k y n) se obtuvieron mediante regresión no lineal, ajustando el modelo directamente a las curvas experimentales de secado.

La bondad de ajuste de ambos modelos se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2).

2.8 Análisis fisicoquímico y microbiológico

Para verificar la calidad del producto final obtenido, se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos utilizando métodos oficiales (Normas Técnicas Ecuatorianas - INEN):

Proteína cruda: Método Kjeldahl (INEN 781), Grasa: Método Soxhlet (INEN 778), Cenizas: Método por incineración en mufla (INEN 786). En el análisis microbiológico, se cuantificaron aerobios mesófilos (INEN 1529-5:2015), y se determinó la ausencia de *Salmonella* spp. (INEN 1529-10:2015) y *Escherichia coli* (INEN 1108:2015).

2.9 Evaluación sensorial

Se realizó una prueba hedónica con 25 panelistas semientrenados, aplicando una escala de 9 puntos para color, textura, sabor y aceptación global, según la norma ISO 4121:2003.

2.10 Análisis estadístico

Con base en la metodología desarrollada por Trujillo et al. (2007) para evaluar el comportamiento del secado en carne bovina, se aplicó un análisis de varianza multifactorial (ANOVA) a los parámetros cinéticos de difusión efectiva (*Deff*) y constante de secado (*k*), considerando un nivel de significancia del 5%. Las comparaciones entre tratamientos se realizaron mediante la prueba de Tukey, lo que permitió identificar diferencias estadísticas relevantes en función de las condiciones experimentales. Para validar la calidad del ajuste de los modelos matemáticos empleados, se calcularon el error cuadrático medio (RMSE) y el chi-cuadrado reducido (χ^2_{red}), los cuales ofrecieron una visión cuantitativa sobre la precisión de las estimaciones. Todo el procesamiento de datos se efectuó utilizando el software Statgraphics Centurion XVI.

3. Resultados

3.1 Comportamiento de la pérdida de humedad

Durante el proceso de secado, se observó una disminución progresiva de la masa en todos los tratamientos. La tasa de pérdida de humedad fue más pronunciada en los tratamientos con temperaturas más elevadas, alcanzando valores de humedad residual por debajo del 10% al finalizar el proceso, condición necesaria para productos cárnicos deshidratados estables desde el punto de vista microbiológico.

3.2 Parámetros cinéticos de secado

Los datos experimentales de la relación de humedad (MR) fueron ajustados a los modelos de Fick y Page. En todos los casos, el modelo de Page presentó un mejor ajuste con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,983 y valores de RMSE bajos. En contraste, el modelo de Fick tendió a subestimar la pérdida de humedad, especialmente en las etapas finales del secado. Los valores de la difusividad efectiva (*Deff*) mostraron un incremento conforme aumentaron la temperatura de secado y la concentración de antioxidante. El valor más alto de *Deff* fue de $9,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ a 120 °C y 1,5% de aditivo, mientras que el más bajo ($4,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) se registró a 110 °C y 1% de aditivo. De forma similar, los valores de la constante de secado (*k*) derivados del modelo de Page aumentaron en condiciones de mayor temperatura y concentración, con rangos entre 0,012 y 0,031 min^{-1} . La Tabla 1 resume los parámetros cinéticos obtenidos por tratamiento.

Tabla 1.

Parámetros cinéticos y coeficientes de determinación por tratamiento.

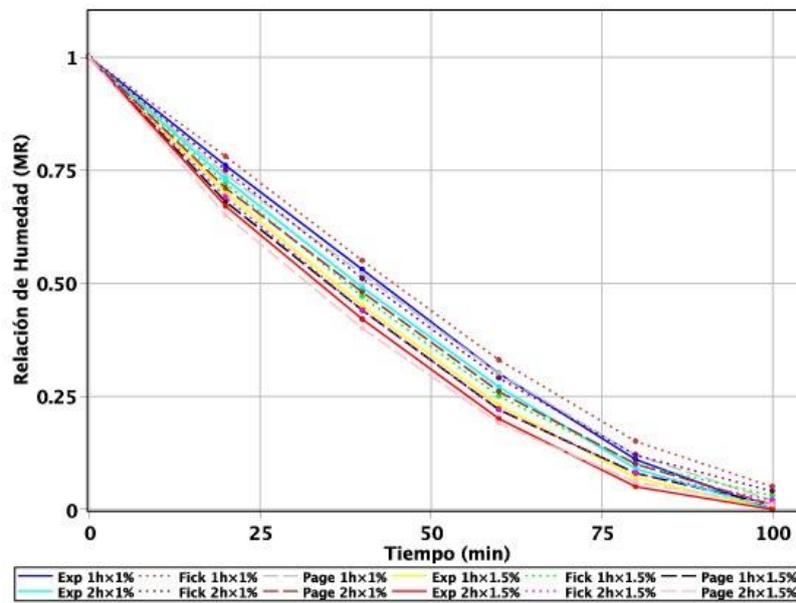
Temp (°C)	Tratamiento	<i>Deff</i> ($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)	<i>k</i> (min^{-1})	n	R^2 (Fick)	R^2 (Page)
110	1h \times 1%	4.8	0.014	1.05	0.991	0.994
110	2h \times 1%	4.5	0.013	1.02	0.990	0.992

Temp (°C)	Tratamiento	$Deff$ ($\times 10^{-9}$ m ² /s)	k (min ⁻¹)	n	R^2 (Fick)	R^2 (Page)
110	1h \times 1.5%	5.2	0.016	1.10	0.985	0.988
110	2h \times 1.5%	5.8	0.018	1.12	0.980	0.983
115	1h \times 1%	6.1	0.017	1.08	0.993	0.995
115	2h \times 1%	5.7	0.016	1.05	0.992	0.994
115	1h \times 1.5%	6.8	0.020	1.15	0.987	0.990
115	2h \times 1.5%	7.3	0.022	1.18	0.982	0.985
120	1h \times 1%	7.5	0.022	1.12	0.995	0.997
120	2h \times 1%	7.0	0.020	1.10	0.994	0.996
120	1h \times 1.5%	8.2	0.025	1.20	0.989	0.992
120	2h \times 1.5%	9.0	0.028	1.25	0.984	0.987

Para visualizar el comportamiento dinámico de la deshidratación, se graficó la relación de humedad (MR) en función del tiempo para los tratamientos representativos, comparando los valores experimentales con los estimados por los modelos de Fick y Page. Tal como se detalla en la Figura 1, el modelo de Page presentó una mayor concordancia con los datos reales, particularmente durante las fases intermedias y finales del proceso, donde el modelo de Fick tendió a subestimar la velocidad de secado. Esta diferencia evidencia la mayor flexibilidad del modelo de Page para describir procesos de transferencia de masa no lineales en matrices cárnicas complejas como la carne DFD.

Figura 1.

Comparación de la Relación de Humedad (MR) Experimental y Modelada (Fick y Page) en Cortes Cárnicos DFD según Tratamientos de Inmersión



3.3 Evaluación estadística de los modelos

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la temperatura y la concentración de antioxidantes ejercieron un efecto estadísticamente significativo sobre la constante de secado (k) y la difusividad efectiva ($Deff$), mientras que el tiempo de inmersión no presentó una influencia significativa. En particular, el coeficiente $Deff$ se vio fuertemente afectado por la temperatura ($F = 59.18$; $p < 0.001$) y la concentración de antioxidantes ($F = 27.25$; $p < 0.01$), lo que sugiere que estos factores potenciaron el proceso de deshidratación mediante un incremento en la velocidad de transferencia de masa. Respecto a la constante de secado k , se observó un comportamiento similar: la temperatura fue el factor más influyente ($F = 40,08$; $p = 0,0001$), seguido de la concentración ($F = 33,35$; $p = 0,0007$), mientras que el efecto del tiempo de inmersión fue estadísticamente no significativo ($p = 0,5415$).

La Tabla 2 y la Tabla 3 presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para $Deff$ y k , respectivamente.

Tabla 2.

Análisis de varianza (ANOVA) – Coeficiente de difusión efectiva ($Deff$)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F_0	p-valor
Temperatura	16.24667	2	8.12333	59.18	0.0000 ***
Tiempo de inmersión	0.04083	1	0.04083	0.30	0.6042 ns
Concentración antioxidante	3.74083	1	3.74083	27.25	0.0012 **
Error	0.96083	7	0.13726	–	–

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	p-valor
Total	20.98917	11	–	–	–

Tabla 3.
Análisis de varianza (ANOVA) – Constante de secado (k)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	p-valor
Temperatura	0.0001460	2	0.0000730	40.08	0.0001 ***
Tiempo de inmersión	0.0000075	1	0.0000075	0.41	0.5415 ns
Concentración antioxidante	0.00006075	1	0.00006075	33.35	0.0007 **
Error	0.00001275	7	0.00000182	–	–
Total	0.00022025	11	–	–	–

La prueba de Tukey, como podemos observar en la Tabla 4, identificó diferencias significativas entre los tratamientos aplicados a diferentes temperaturas. Para el coeficiente *Deff*, se observaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos a 110 °C y 120 °C ($p = 0.0009$), y significativas entre 115 °C y 120 °C ($p = 0.0475$). Para la constante de secado *k*, la única diferencia significativa se produjo entre 110 °C y 120 °C ($p = 0.0042$), lo cual refuerza el papel clave de la temperatura como factor determinante en la eficiencia del proceso.

Tabla 4.
Comparaciones múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$)

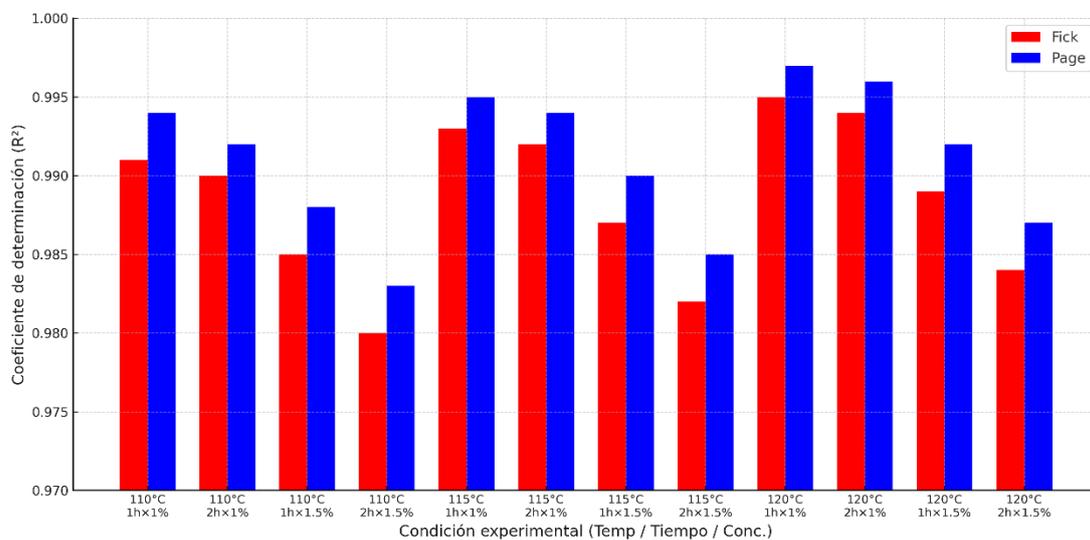
Variable: <i>Deff</i> ($\times 10^{-8}$ m ² /s)					
Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior	Límite superior	p-valor	Significancia
110 °C vs 115 °C	1.40	-0.03	2.83	0.0553	ns
110 °C vs 120 °C	2.85	1.42	4.28	0.0009	**
115 °C vs 120 °C	1.45	0.02	2.88	0.0475	*
Variable: <i>k</i> (min ⁻ⁿ)					
Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior	Límite superior	p-valor	Significancia
110 °C vs 115 °C	0.0035	-0.0022	0.0092	0.2491	ns

110 °C vs 120 °C	0.0085	0.0028	0.0142	0.0042	**
115 °C vs 120 °C	0.0050	-0.0007	0.0107	0.0835	ns

Adicionalmente, la comparación de los coeficientes de determinación (R^2) para cada uno de los tratamientos permitió evaluar cuantitativamente la capacidad predictiva de ambos modelos. Como se observa en la Figura 2, el modelo de Page obtuvo valores de R^2 sistemáticamente más altos que el modelo de Fick, lo cual confirma su mayor precisión estadística para describir la cinética de secado bajo distintas condiciones térmicas y composicionales. Este comportamiento es coherente con estudios previos realizados en carnes curadas y productos cárnicos deshidratados.

Figura 2.

Comparación de R^2 entre modelos Fick y Page



3.4. Análisis de residuos y validación del modelo

El análisis de residuos se llevó a cabo con el fin de evaluar la precisión y consistencia de los modelos cinéticos aplicados. Para ello, se calculó la diferencia entre los valores experimentales de la relación de humedad (MR) y los valores estimados por los modelos de Fick y Page en cuatro tratamientos representativos. Los residuos obtenidos para diferentes intervalos de tiempo se presentan en la Tabla 6.

En general, el modelo de Fick mostró una tendencia a subestimar la pérdida de humedad, especialmente en las etapas avanzadas del proceso de secado ($t > 60$ min), con residuos negativos crecientes. Por el contrario, el modelo de Page exhibió una distribución más equilibrada de errores, con valores más cercanos a cero durante todo el intervalo de tiempo analizado. Esta diferencia refleja una mayor estabilidad y ajuste del modelo empírico frente al modelo difusivo.

Tabla 6.

Residuos (MR experimental – MR modelo) (para tratamientos representativos seleccionados)

Tiempo (min)	T1 - Fick	T1 - Page	T2 - Fick	T2 - Page	T3 - Fick	T3 - Page	T4 - Fick	T4 - Page
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02
40	-0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.02
60	-0.03	0.00	-0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.01
80	-0.04	-0.01	-0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.03	-0.01
100	-0.05	-0.02	-0.03	-0.01	-0.04	-0.01	-0.02	-0.01

Para validar cuantitativamente la calidad del ajuste de los modelos, se calculó el valor de χ^2 reducido (χ^2_{red}). Este parámetro permite estimar la dispersión del error teniendo en cuenta los grados de libertad del modelo. En la Tabla 7 se presentan los valores de χ^2_{red} para todos los tratamientos y ambos modelos. En todos los tratamientos evaluados, los valores de χ^2_{red} fueron más bajos para el modelo de Page, lo cual indica una menor dispersión del error y, por tanto, una mejor capacidad predictiva.

Tabla 7.

Valores de χ^2_{red} para ambos modelos cinéticos

Temperatura (°C)	Tratamiento	χ^2_{red} (Fick)	χ^2_{red} (Page)
110	1h x 1%	0,0042	0,0038
110	2h x 1%	0,0039	0,0035
110	1h x 1,5%	0,0051	0,0047
110	2h x 1,5%	0,0055	0,0050
115	1h x 1%	0,0035	0,0032
115	2h x 1%	0,0038	0,0034
115	1h x 1,5%	0,0042	0,0039
115	2h x 1,5%	0,0048	0,0043
120	1h x 1%	0,0030	0,0028
120	2h x 1%	0,0033	0,0030

Temperatura (°C)	Tratamiento	χ^2 red (Fick)	χ^2 red (Page)
120	1h x 1,5%	0,0037	0,0034
120	2h x 1,5%	0,0041	0,0038

3.5 Resultados fisicoquímicos

El análisis de las variables fisicoquímicas indicó que todos los tratamientos lograron un contenido proteico superior al 25 %, cumpliendo con los criterios nutricionales establecidos para productos cárnicos deshidratados de alto valor. El contenido de grasa total se mantuvo en un rango entre 2,2 % y 5,7 %, mientras que el contenido de cenizas osciló entre 5,0 % y 7,8 %. Estos resultados reflejan el efecto combinado del secado y la formulación de salmuera sobre la concentración relativa de sólidos, como se evidencia en estudios previos sobre productos cárnicos sometidos a procesos de deshidratación térmica controlada.

Los valores de pH registrados fueron consistentemente superiores a 6,0, lo cual concuerda con el perfil característico de la carne DFD. Esta condición favoreció una mayor capacidad de retención de agua y redujo la pérdida por cocción, aspectos fundamentales para conservar la jugosidad del producto final. Además, los tratamientos más eficaces lograron reducir la actividad de agua (a_w) por debajo de 0,85, umbral que limita la proliferación microbiana y contribuye a una mayor vida útil del alimento sin necesidad de refrigeración prolongada.

3.6 Resultados microbiológicos

Se efectuaron análisis microbiológicos para determinar la calidad sanitaria de los productos deshidratados obtenidos. Los tratamientos seleccionados presentaron recuentos de aerobios mesófilos totales menores a $1,7 \times 10^5$ UFC/g, con valores particularmente bajos ($< 7,0 \times 10^4$ UFC/g) en las muestras tratadas con 1,5 % de antioxidante y mayores temperaturas. Además, no se detectó presencia de *Salmonella spp.* ni *Escherichia coli* en ninguna de las muestras analizadas, lo cual confirma la efectividad del tratamiento térmico y del pretratamiento en salmuera con antioxidantes como método de conservación microbiológicamente seguro. Los resultados se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8.

Resultados microbiológicos de los tratamientos seleccionados

Tratamiento	Mesófilos aerobios (UFC/g)	<i>E. coli</i>	<i>Salmonella spp.</i>
T1	$7,0 \times 10^4$	Ausencia	Ausencia
T6	$1,7 \times 10^5$	Ausencia	Ausencia
T11	$1,2 \times 10^5$	Ausencia	Ausencia

3.7 Evaluación sensorial

El análisis sensorial se aplicó a los mismos tratamientos (T1, T6 y T11), evaluando atributos como color, olor, sabor, textura y aceptabilidad global. El color predominante fue "rojizo intenso" referencia Pantone 490 C, asociado a una reacción de Maillard adecuada y un secado

homogéneo. En cuanto al olor, los panelistas destacaron aromas agradables a carne fresca y ligeramente ahumados, sin presencia de notas indeseables.

Respecto al sabor, se observaron preferencias hacia perfiles ligeramente salados y ahumados, con características típicas de la carne seca. La textura fue descrita como firme, masticable y uniforme, sin llegar a ser dura o desagradable al paladar. La prueba de aceptabilidad reveló que el 66,7 % de los jueces calificaron el producto como “bueno” y el 16,7 % como “excelente”, sin registros en las categorías “malo” o “pésimo”, lo que evidencia una buena recepción del producto por parte de los consumidores potenciales.

4. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que los tratamientos con soluciones salinas antioxidantes influyeron significativamente en la cinética de secado de la carne DFD. El modelo de Page presentó un mejor ajuste en todos los tratamientos en comparación con el modelo de Fick, tal como lo reportan estudios similares aplicados a carnes curadas o sometidas a procesos osmóticos (Kucuk et al., 2014; Mewa et al., 2018). La presencia de ácido ascórbico en la solución salina favoreció una mayor homogeneidad en la tasa de secado, posiblemente debido a su efecto estabilizador sobre las proteínas sarcoplasmáticas y estructurales, lo que redujo el colapso de la matriz muscular durante el secado.

Los coeficientes de difusividad efectiva ($Deff$) determinados oscilaron entre $8,12 \times 10^{-10}$ y $2,35 \times 10^{-9}$ m^2/s , valores que se encuentran dentro del rango reportado para carne bovina tratada térmicamente o marinada previamente, tal como lo evidencian Mewa et al. (2018), Comaposada et al. (2009), Choi et al. (2008) y Lim et al. (2013), quienes reportan valores entre 10^{-10} y 10^{-9} m^2/s dependiendo del método y el pretratamiento empleado. Asimismo, el parámetro cinético k mostró variabilidad entre tratamientos, reflejando las diferencias en la facilidad con la que el agua se difundió a través de la estructura proteica modificada por la salmuera con ácido ascórbico.

Diversos estudios recientes han demostrado que el uso de soluciones salinas enriquecidas con antioxidantes mejora de forma significativa la cinética de secado y la calidad final en diferentes matrices cárnicas. Por ejemplo, la adición de extractos naturales ricos en compuestos antioxidantes, como *Salicornia herbacea*, ha permitido reducir los tiempos de secado y mejorar tanto la textura como el color en productos tipo jerky, evidenciando la capacidad de estos sistemas para optimizar la eficiencia del proceso (Lim et al., 2013). Asimismo, la combinación de ácido ascórbico con extracto de hoja de níspero mostró no solo una mejora en la estabilidad del color, sino también una disminución significativa en el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad deseado, lo que respalda la hipótesis de que los antioxidantes pueden modificar favorablemente la transferencia de masa durante el secado (Kim et al., 2022). Estos resultados coinciden con los obtenidos en el presente estudio, donde el uso de salmueras antioxidantes permitió optimizar el proceso de deshidratación de carne DFD, y sugieren que la estrategia puede extrapolarse con éxito a otros tipos de productos cárnicos que presenten desafíos similares de oxidación y retención de agua.

Los modelos de superficie de respuesta presentaron un ajuste sobresaliente (R^2 ajustado > 0,999), aunque sin significancia estadística en los coeficientes. Esta condición podría atribuirse a un posible sobreajuste o al número limitado de repeticiones, tal como advierte Favetto et al. (1981) al trabajar con modelos multivariantes en procesos de deshidratación.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el contenido proteico superior al 25 % alcanzado en los tratamientos más eficientes refleja una buena retención de la fracción estructural del músculo. Estos valores son comparables con los reportados por Álvarez et al. (2021), quienes analizaron carne madurada y deshidratada obteniendo concentraciones similares. Asimismo, el pH elevado (superior a 6,0) se mantuvo estable, lo cual coincide con lo establecido por Adzitey & Nurul (2011) para carne DFD, y favorece una mejor capacidad de retención de agua y menor exudado tras la cocción.

Desde el punto de vista microbiológico, se obtuvo una reducción efectiva de la actividad de agua (a_w), alcanzando valores inferiores a 0,85 en los tratamientos más eficaces. Este resultado es relevante, ya que diversas normativas internacionales, como el Codex Alimentarius Regional Standard for Dried Meat (CXS 333R-2022) y las guías del FSIS (2021), establecen que una actividad de agua menor a 0,85 inhibe el crecimiento de la mayoría de bacterias patógenas. En este caso, el control de a_w logrado respalda la estabilidad del producto y su seguridad durante el almacenamiento sin refrigeración.

Los resultados microbiológicos confirmaron la inocuidad del proceso, con recuentos de mesófilos aerobios por debajo del límite establecido por la norma INEN 1529-5:2015 y ausencia total de *Salmonella spp.* y *Escherichia coli* (según INEN 1529-10:2015 e INEN 1108:2015, respectivamente). Estas observaciones coinciden con los criterios de seguridad microbiológica exigidos para productos cárnicos deshidratados listos para el consumo.

En cuanto a la calidad sensorial, los tratamientos con ácido ascórbico presentaron ventajas notables en la retención del color característico de la carne y una textura más firme y elástica. Estos atributos están estrechamente relacionados con la aceptabilidad del consumidor, especialmente en productos tipo jerky o carne seca, donde la apariencia y masticabilidad determinan la preferencia de compra. Estudios como los de Choi et al. (2008), Kim et al. (2022) y Lim et al. (2013) confirman que la combinación de ácido ascórbico y secado térmico preserva mejor el color rojo estable, reduce el deterioro oxidativo e incrementa la percepción positiva del consumidor. En el presente estudio, los panelistas sensoriales destacaron la intensidad del color, la jugosidad residual y la facilidad de masticación en los tratamientos optimizados, lo cual refuerza su posible aceptación comercial en nichos de mercado interesados en snacks cárnicos de alta calidad.

Además, se observó que los tratamientos más eficaces presentaron un equilibrio entre velocidad de secado, reducción de a_w y conservación de atributos sensoriales, lo que posiciona esta estrategia como una alternativa viable para valorizar la carne DFD. Esta tecnología puede ser incorporada en pequeñas y medianas plantas procesadoras para producir snacks proteicos funcionales con mayor valor agregado y vida útil prolongada, en concordancia con las tendencias de consumo y las exigencias de seguridad alimentaria actuales.

5. Conclusiones

El presente estudio permitió establecer que la combinación de inmersión en salmuera antioxidante y secado convectivo constituye una estrategia eficaz para revalorizar carne bovina DFD, un subproducto generalmente considerado de bajo valor comercial debido a sus características fisicoquímicas inadecuadas. La integración de variables de proceso como la temperatura, el tiempo de inmersión y la concentración de ácido ascórbico influyó

significativamente sobre la cinética de secado y la calidad del producto final, permitiendo su transformación en un alimento estable, inocuo y sensorialmente aceptable.

Uno de los principales hallazgos de la investigación fue la superioridad del modelo de Page frente al modelo de Fick para describir la dinámica de deshidratación en esta matriz cárnica compleja. Este modelo no solo mostró una mejor capacidad de predicción, evidenciada por coeficientes de determinación elevados y residuos mínimos, sino que también permitió una caracterización más precisa de los efectos no lineales propios del proceso. Esta contribución metodológica ofrece una base sólida para futuros estudios de simulación y optimización del secado en productos similares.

Desde el punto de vista tecnológico, se demostró que el aumento de la temperatura y la incorporación de una mayor concentración de antioxidantes (1,5 %) potencian la velocidad de deshidratación, sin comprometer la estabilidad ni la aceptabilidad sensorial del producto. Esta relación directa entre las condiciones de tratamiento y los parámetros cinéticos ($Deff$ y k) abre posibilidades para el diseño racional de procesos térmicos ajustados a objetivos de eficiencia, calidad y seguridad alimentaria.

La calidad fisicoquímica del producto deshidratado (método combinado de conservación) fue adecuada, con contenidos proteicos superiores al 25 %, actividad de agua (a_w) por debajo de 0,85 y pH estable, lo que asegura su conservación sin necesidad de refrigeración prolongada. Estos atributos refuerzan su potencial como alimento funcional, altamente nutritivo y viable para su comercialización en mercados especializados o como ingrediente para formulaciones de alto valor.

Los análisis microbiológicos confirmaron la inocuidad del producto obtenido, ya que todos los tratamientos evaluados cumplieron con los límites establecidos por las normativas nacionales, mostrando la ausencia total de *Salmonella spp.* y *E. coli*. Esta evidencia fortalece la aplicabilidad del proceso propuesto como alternativa segura en la industria cárnica, especialmente en regiones donde la cadena de frío no siempre puede garantizarse.

Adicionalmente, el análisis sensorial demostró que los tratamientos con soluciones antioxidantes favorecieron la percepción positiva de los consumidores, al preservar color, textura firme y sabor característico. Esto representa una ventaja competitiva en el mercado de productos cárnicos tipo jerky o snacks proteicos, donde la calidad visual y de masticabilidad son determinantes para la aceptación.

Por último, este enfoque puede contribuir a reducir el desperdicio de carne DFD en plantas de procesamiento, otorgándole valor agregado mediante tecnologías accesibles y eficientes. Su aplicación en industrias pequeñas y medianas permite fortalecer las cadenas de valor, reducir pérdidas económicas y alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), promoviendo así un modelo agroalimentario más resiliente y sostenible.

Contribución de los autores: Conceptualización, R.U.L.S., A.R.A.J. y Á.V.C.M.; metodología, R.U.L.S. y A.R.A.J.; software, R.U.L.S.; validación, R.U.L.S.; análisis formal, R.U.L.S.; investigación, R.U.L.S., A.R.A.J. y Á.V.C.M.; recursos, R.U.L.S., A.R.A.J., Á.V.C.M. y Y.J.M.L.; curación de datos, A.R.A.J.; redacción del borrador original, R.U.L.S. y A.R.A.J.; redacción, revisión y edición, R.U.L.S., A.R.A.J., Á.V.C.M. y Y.J.M.L.; visualización, R.U.L.S., A.R.A.J., Á.V.C.M. y Y.J.M.L.; supervisión, R.U.L.S., A.R.A.J., Á.V.C.M. y Y.J.M.L.;

administración del proyecto, A.R.A.J.; adquisición de financiamiento, A.R.A.J. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Los autores no han recibido fondos externos para esta investigación.

Agradecimientos: Al laboratorio de Bromatología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo donde se desarrolló la experimentación para esta investigación”

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias Bibliográficas

- Adzitey, F., & Nurul, H. (2011). Pale soft exudative (PSE) and dark firm dry (DFD) meats: Causes and measures to reduce these incidences—a mini review. *International Food Research Journal*, 18(1), 11–20.
- Ahn, D. U., & Nam, K. C. (2004). Effect of ascorbic acid and antioxidants on color, lipid oxidation and volatiles of irradiated ground beef. *Radiation Physics and Chemistry*, 71, 149–154.
- Álvarez, S., Álvarez, C., Hamill, R., Mullen, A. M., & O'Neill, E. (2021). Drying dynamics of meat highlighting areas of relevance to dry-aging of beef. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, 5370–5392. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12845>
- Bampi, M., Schmidt, F. C., & Laurindo, J. B. (2019). A fast drying method for the production of salted-and-dried meat. *Food Science and Technology*, 39(Suppl. 2), 526-534. <https://doi.org/10.1590/fst.24418>
- Choi, J.-H., Jeong, J.-Y., Han, D.-J., Choi, Y.-S., Kim, H.-Y., Lee, M.-A., Lee, E.-S., Paik, H.-D., & Kim, C.-J. (2008). Effects of pork/beef levels and various casings on quality properties of semi-dried jerky. *Meat Science*, 80(2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.028>
- Codex Alimentarius Commission. (2022). Regional standard for dried meat (CXS 350R-2022). FAO/WHO. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>
- Comaposada, J., Arnau, J., Garriga, M., Ferrini, G., Xargayó, M., Bernardo, J., Corominas, M., Gou, P., Freixanet, L., Lagares, J., & Monfort, J. M. (2009). Fast drying of dry-cured meat products: Quick-Dry-Slice (QDS) process technology. *Tehnologija Mesa*, 50(1-2), 54–59.
- Favetto, G., Chirife, J., & Bartholomai, G. B. (1981). A study of water activity lowering in meat during immersion-cooking in sodium chloride-glycerol solution. II. Kinetics of a_w lowering and effect of some process variables. *Journal of Food Technology*, 16(6), 621-628.
- Food Safety and Inspection Service (FSIS), United States Department of Agriculture (USDA). (2014). Compliance guideline for meat and poultry jerky produced by small and very small establishments. <https://www.fsis.usda.gov/guidelines>

- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A. F., Silva, P. F., Valdes-Serra, J. C., & Pavlak, M. C. de M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179–182. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000100027>
- Kim, S.-M., Kim, T.-K., Kang, M.-C., Cha, J. Y., Yong, H. I., & Choi, Y.-S. (2022). Effects of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) leaf extract with or without ascorbic acid on the quality characteristics of semi-dried restructured jerky during storage. *Food Science of Animal Resources*, 42(4), 566–579. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e19>
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., & Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology*, 32(7), 757–773. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>
- Leyva-García, I. A., Figueroa-Saavedra, F., Sánchez-López, E., Pérez-Linares, C., & Barreras-Serrano, A. (2012). Impacto económico de la presencia de carne DFD en una planta de sacrificio Tipo Inspección Federal (TIF). *Archivos de Medicina Veterinaria*, 44(1), 39-42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173023960006>
- Lim, D.-G., Choi, K.-S., Kim, J.-J., & Nam, K.-C. (2013). Effects of *Salicornia herbacea* powder on quality traits of sun-dried Hanwoo beef jerky during storage. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 33(2), 205–213. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2013.33.2.205>
- Loredo-Osti, C., Cervantes, J. F., & Vallejo, L. H. (2021). Evaluación de los componentes del manejo antes, durante y después de la matanza en la calidad de la carne de bovino. *Rev Mex CiencPecu*, 12(3):773-788. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.4866>
- Mancini, R. A., & Hunt, M. C. (2004). Ascorbic acid minimizes lumbar vertebrae discoloration. *Meat Science*, 68(3), 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.03.017>
- Mancini, R. A., Hunt, M. C., Seyfert, M., Kropf, D. H., Hachmeister, K. A., Herald, T. J., & Johnson, D. E. (2007). Comparison of ascorbic acid and sodium erythorbate: Effects on the 24 h display colour of beef lumbar vertebrae and longissimus lumborum packaged in high-oxygen modified atmospheres. *Meat Science*, 75(1), 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.06.012>
- Mancini, R. A., Hunt, M. C., Seyfert, M., Kropf, D. H., Hachmeister, K. A., Herald, T. J., & Johnson, D. E. (2007). Effects of ascorbic and citric acid on beef lumbar vertebrae marrow colour. *Meat Science*, 76(3), 568–573. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.01.015>
- Mediani, A., Hamezah, H. S., Jam, F. A., Mahadi, N. F., Chan, S. X. Y., Rohani, E. R., ... & Abas, F. (2022). A comprehensive review of drying meat products and the

- associated effects and changes. *Frontiers in Nutrition*, 9, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1057366>
- Mewa, E. A., Okoth, M. W., Kunyanga, C. N., & Rugiri, M. N. (2018). Drying modelling, moisture diffusivity and sensory quality of thin layer dried beef. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 6(2), 552–565. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.2.29>
- NTE INEN 1529. (1990). Control microbiológico de los alimentos. Determinación de microorganismos coliformes por la técnica de recuento de colonias. (Vol. 7). <https://ia801602.us.archive.org/8/items/ec.nte.1529.7.1990/ec.nte.1529.7.1990.pdf>
- NTE INEN 778. (1985). Carne y Productos Cárnicos. Determinación de la grasa total. (Vol. 0778). <https://ia801900.us.archive.org/3/items/ec.nte.0778.1985/ec.nte.0778.1985.pdf>
- NTE INEN 781. (1985). Norma técnica ecuatoriana de carne y productos cárnicos. Determinación del Nitrógeno. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/781.pdf>
- NTE INEN 786. (1985). Carne y Productos Cárnicos. Determinación de cenizas. (Vol. 05). <https://ia601901.us.archive.org/1/items/ec.nte.0786.1985/ec.nte.0786.1985.pdf>
- Pérez-Linares, C., Barreras S., A., Sánchez L., E., Herrera S., B., & Figueroa-Saavedra, F. (2015). The effect of changing the pre-slaughter handling on bovine cattle DFD meat. *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), 4688-4697. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69341382003>
- Rahman, M. M., Hashem, M. A., Azad, M. A. K., Choudhury, M. S. H., & Bhuiyan, M. K. J. (2023). Techniques of meat preservation: A review. *Meat Research*, 3(3), Article 55. <https://doi.org/10.55002/mr.3.3.55>
- Trujillo, F. J., Wiangkaew, C., & Pham, Q. T. (2007). Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.010>