

FORMACIÓN DE NITROSAMINAS EN EMBUTIDOS Y CARNES PROCESADAS Y SU PAPEL EN LA CARCINOGENESIS

THE FORMATION OF NITROSAMINES IN SAUSAGES AND PROCESSED MEATS AND THEIR ROLE IN CARCINOGENESIS

Jaime Andrés Camino Valdez¹, Luis Alberto Toala Murillo², Remilton Agustín Ramírez Reyes³,
Daniel Joel Petroche Torres⁴, Frella Soraya García Larreta⁵

{jaime.caminov@ug.edu.ec¹, luis.toalam@ug.edu.ec², remilton.ramirezr@ug.edu.ec³,
danielpetroche933@gmail.com⁴, garcial@ug.edu.ec⁵}

Fecha de recepción: 27/02/2026 / Fecha de aceptación: 12/03/2026 / Fecha de publicación: 30/04/2026

RESUMEN: En el ámbito de la seguridad alimentaria actual, se plantea una asignatura pendiente por la existencia de nitrosaminas (NAs) en productos de origen cárnico procesados, que son unos compuestos que han mostrado ser capaces de inducir carcinogénesis. Este artículo tiene como objetivo descubrir los mecanismos químicos que provocan la formación de las nitrosaminas en los embutidos y sus consecuencias directas como potencial oncogénico, particularmente en el caso del cáncer colorrectal. Para este propósito, se empleó una metodología de revisión sistemática de tipo PRISMA y se escogieron un total de 25 artículos de revistas de tipo indexado en bases de datos como PubMed y Scopus, cuya publicación fue entre los años 2018 y 2026. La serie de resultados muestra que la interacción entre el nitrito de sodio como conservante y las aminas secundarias de la carne y como catalizadores a procesos térmicos muy elevados provocan la rápida formación de los compuestos N-nitroso, los cuales fueron identificados como consecuencia de una exposición crónica a los aductos de ADN, particularmente la O⁶-metilguanina, la cual lleva a que sucedan mutaciones genéticas críticas. A partir de toda la información se llega a la conclusión que el uso de nitritos es necesario para prevenir el botulismo, pero también es necesario que la industria agroalimentaria implemente antioxidantes naturales y desarrolle procesos de curación biotecnológicos; estas funciones son necesarias para disminuir la carga tóxica tanto exógena como endógena, asegurando así productos más seguros para el consumidor sin buenas prácticas de inocuidad microbiológica dentro de la cadena de valor proteica.

Palabras clave: Nitrosaminas, carnes procesadas, carcinogénesis, nitritos, seguridad alimentaria

¹Universidad de Guayaquil, <https://orcid.org/0000-0002-7699-2670>

²Universidad de Guayaquil, <https://orcid.org/0009-0003-5014-4985>

³Universidad de Guayaquil, <https://orcid.org/0000-0003-3944-6539>

⁴Universidad de Guayaquil, <https://orcid.org/0009-0009-8581-2377>

⁵Universidad de Guayaquil, <https://orcid.org/0000-0002-5893-5939>

ABSTRACT: In the current food safety landscape, the presence of nitrosamines (NAs) in processed meat products remains an unresolved issue, as these compounds have been shown to induce carcinogenesis. This article aims to uncover the chemical mechanisms that cause the formation of nitrosamines in sausages and their direct consequences, such as their potential oncogenicity, particularly in the case of colorectal cancer. For this purpose, a PRISMA-compliant systematic review methodology was employed, and a total of 25 articles from journals indexed in databases such as PubMed and Scopus were selected, all published between 2018 and 2026. The results show that the interaction between sodium nitrite as a preservative and the secondary amines in meat, acting as catalysts in very high-temperature processes, leads to the rapid formation of N-nitroso compounds, which were identified as a result of chronic exposure to DNA adducts, particularly O⁶-methylguanine, which leads to critical genetic mutations. Based on all the information, it is concluded that the use of nitrites is necessary to prevent botulism, but it is also necessary for the agri-food industry to implement natural antioxidants and develop biotechnological curing processes; these measures are necessary to reduce the toxic load ta. The results show that the interaction between sodium nitrite (as a preservative) and the secondary amines in meat (which act as catalysts) under very high temperatures leads to the rapid formation of N-nitroso compounds, which were identified as a result of chronic exposure to DNA adducts, particularly O⁶-methylguanine, which leads to critical genetic mutations. Based on all the information, it is concluded that the use of nitrites is necessary to prevent botulism, but it is also necessary for the agri-food industry to implement natural antioxidants and develop biotechnological curing processes; these measures are necessary to reduce both exogenous and endogenous toxic loads, thereby ensuring safer products for consumers in the absence of good microbiological safety practices within the protein value chain.

Keywords: *Nitrosamines, processed meats, carcinogenesis, nitrites, food safety*

INTRODUCCIÓN

A escala internacional, la industria de los productos cárnicos procesados es uno de los sectores más boyantes del ámbito agroalimentario, como consecuencia de su versatilidad, bajo coste y gran aceptación por parte de los consumidores (1). Sin embargo, este desarrollo se ha visto acompañado de una creciente preocupación en relación con la salud pública. En el año 2015 la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) presentó una de sus más importantes clasificaciones, al ubicar el consumo de la carne procesada en el Grupo 1 de los agentes carcinogénicos para los seres humanos, al igual que el tabaco o el asbesto (2), (3). Esta clasificación se basa fundamentalmente en la amplia información epidemiológica que hay sobre la asociación de ingestión frecuente de embutidos con el desarrollo de neoplasias malignas, en la que el cáncer colorrectal es de los que tienen mayor frecuencia (4).

En el ámbito de la tecnología de los alimentos, el empleo de los nitritos y nitratos sódicos se encuentra establecido como una práctica que cumple con funciones multisectoriales de

funcionamiento: actúan como agentes antimicrobianos clave frente a la peligrosidad de patógenos como el *Clostridium botulinum*, permiten estabilizar el color rosado de la carne mediante la formación de nitrosomioglobina y contribuyen a la expresión del perfil sensorial del curado(5), (6). Pese a estas consideraciones técnicas, la seguridad química de estos aditivos ha sido puesta en duda. El problema principal radica en el que los nitritos, en determinadas condiciones de acidez gástrica o altas temperaturas de procesamiento, reaccionan con las aminos y las amidas secundarias a modo de matriz proteica, generando nitrosaminas (NAs), compuestos con un poder mutagénico muy contundente (7)(8).

En los distintos trabajos generales se ha podido establecer hasta el momento que la formación de estos compuestos N-nitroso (NOCs) no es exclusiva del procesamiento industrial, sino que también pueden surgir de forma endógena en el tracto digestivo humano tras la ingestión de nitritos residuales (9), (10). En el plano molecular, los trabajos más particulares indican que la toxicidad de las nitrosaminas se muestra mediante su bioactivación metabólica por parte de las enzimas del citocromo P450, conduciendo a la formación de iones diazonio capaces de alquilar el ADN (11), (12). Consideramos que esta alteración genética es la antesala de la carcinogénesis, ya que la incapacidad de las células para reparar este tipo de alteraciones, deviene en la proliferación celular no controlada (13).

La actualidad de este trabajo responde en cierta forma al interés de sintetizar la evidencia más reciente sobre los factores que inducen la conversión de nitritos en agentes carcinogénicos. A pesar de que ya existen legislaciones que limitan el uso de las sales de curado, la variabilidad en los métodos de cocción doméstica, así como la interacción de la carne procesada con los demás componentes de la dieta, ofrecen un panorama incierto de riesgo para el consumidor. Por todo ello, se hace necesario desvelar los mecanismos de formación de las NAs, así como estudiar qué medidas biotecnológicas actuales hay en el mercado para limitar su impacto sin menoscabar la inocuidad microbiológica de los alimentos (14), (15).

De acuerdo con ello, el presente trabajo tiene como objetivo repasar los mecanismos químicos de formación de nitrosaminas en embutidos y en carnes procesadas así como determinar su papel biológico en la inducción de la carcinogénesis mediante una revisión sistemática de la literatura científica de gran impacto.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación ha sido realizada (desarrollada) mediante una revisión sistemática de literatura, de tipo bibliográfica y con un diseño cualitativo-descriptivo. Este estudio se fundamentó en la localización, selección y análisis crítico de documentos científicos originales de revistas indexadas y de alto impacto. La inclusión del modelo de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), el cual asegura la transparencia y replicabilidad del proceso, ha permitido seguir el protocolo del propio PRISMA.

La población inicial queda constituida por los artículos científicos que tratan sobre compuestos N-nitroso en alimentos y salud humana según la búsqueda efectuada en los artículos científicos en bases de datos. El conjunto de artículos que se incluyeron finalmente quedó constituido por 25 artículos que respetaban estrictamente los criterios de entrada: estudios publicados entre 2018 y 2026, posibilidad de acceso a texto completo, comprobación de la calidad metodológica y pertinencia a los mecanismos de carcinogénesis colorrectal.

La búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos bibliográficas más prestigiosas: PubMed, ScienceDirect, Scopus y Web of Science. Se utilizaron descriptores de salud (MeSH), así como términos booleanos concretos como *Nitrosamines AND Processed Meat AND Carcinogenesis*.

Al ser una revisión bibliográfica, las mediciones se centraban en la comparación de las variables clave como los niveles de nitrito residual (mg/kg), las concentraciones de N-nitrosodimetilamina (NDMA) obtenidas a partir de cromatografía y las tasas de riesgo relativo (RR) puestas en evidencia en los estudios epidemiológicos. El trabajo de los datos se llevó a cabo mediante una síntesis narrativa y comparativa de los resultados ofrecidos por cada uno de los autores

Tabla 1. Protocolo de revisión

Fase del proceso	Actividad específica	Criterios / herramientas
Definición	Formulación de la pregunta de investigación mediante el esquema PICO.	Relación: Ingesta de NAs vs. Daño en ADN.
Búsqueda	Ejecución de estrategias de búsqueda en motores científicos.	Uso de términos: <i>Food safety, Nitrosation, DNA adducts</i> .
Cribano (Screening)	Lectura crítica de títulos y resúmenes para eliminar duplicados.	Exclusión de artículos de opinión o sin revisión por pares.
Selección	Evaluación de la calidad técnica de los estudios seleccionados.	Criterio de exclusión: Estudios con muestra insuficiente o sesgos.
Extracción	Recolección de datos específicos en fichas de registro.	Parámetros: Tipo de embutido, temperatura y marcador tumoral.
Síntesis	Integración de resultados para la discusión final.	Comparación de mecanismos exógenos y endógenos.

El diseño metodológico permite ir más allá de la mera descripción sobre hechos hasta hallar un entendimiento profundo de la cinética química de las nitrosaminas. El uso del método PRISMA garantizan que la selección de la evidencia no sea arbitraria sino que responda a un proceso de filtrado sistemático. Al centrar la muestra en revistas con mayor impacto (Q1 y Q2), se garantiza que los datos sobre la formación de aductos de ADN y bioactivación por el metabolismo tengan la validez científica suficiente para respaldar las conclusiones de este artículo. Dicha opción permite conectar los resultados de la tecnología de los alimentos con la toxicología molecular de forma coherente y objetiva.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la cinética de formación de nitrosaminas (NAs) evidencian que la ruta sintética para la formación de compuestos N-nitroso (NOCs) está regida por la disponibilidad de nitrito residual y la severidad del tratamiento térmico. El carácter de la lectura cautivante antes de entrar a la comparación de los estudios demostrada en la literatura sugiere que el método de cocción es el que condiciona la concentración de N-nitrosodimetilamina (NDMA) y N-nitrosopirrolidina (NPYR).

Tabla 2. Impacto de la temperatura y tiempo de cocción en la formación de NAs

Técnica de procesamiento	Temperatura (°C)	NDMA (µg/kg)	NPYR (µg/kg)
Curado en frío	4-12	0,2-0,8	< 0,1
Hervido / vapor	100	1,5-2,4	0,3-0,6
Horneado	180	3,2-5,1	1,8-2,5
Fritura en sartén	170-190	12,4-18,7	8,2-14,2
Asado a la parrilla	> 220	15,1-22,3	10,5-18,9

En la Tabla 2 el hallazgo importante constatado en esta comparativa es la identificación de un umbral térmico crítico de 150°C. El efecto de la temperatura evidenciado. Cuando el hervido (100°C) mantiene las concentraciones de NDMA dentro de un rango basal, la fritura y el asado provocan incrementos de 600% a 900%. Ello sucede porque el calor seco vuelve más fácil la deshidratación de la superficie del alimento, lo que permite que la temperatura local supere el punto de ebullición del agua, la descarboxilación de los aminoácidos libres.

Los mecanismos de bioactivación y genotoxicidad demarcan la evidencia molecular que determina que las nitrosaminas son pro-carcinógenos que requieren dicha activación enzimática para ejercer su acción mutagénica, la cual tiene lugar predominantemente a nivel hepático y en el epitelio del colon.

Tabla 3. Marcadores de daño molecular inducidos por nitrosaminas

Mecanismo	Enzima/vía involucrada	Resultado biológico	Efecto celular
Activación	CYP2E1 (Citocromo P450)	Formación de iones diazonio	Generación de electrófilos reactivos
Alquilación	Interacción con Guanina	Formación de O^6 metilguanina	Aductos de ADN estables
Mutagénesis	Falla de la proteína MGMT	Transición G:C → A:T	Activación del oncogén <i>KRAS</i>

La Tabla 3 conecta la química de los alimentos con la oncología molecular demostrando que las nitrosaminas actúan como agentes alquilantes y indirectos, la dependencia enzimática es observada en el papel desempeñado por el CYP2E1 es fundamental; sin esta activación metabólica, las nitrosaminas serían excretadas sin ejercer efecto alguno. Esto sugiere que las personas con polimorfismos que sobreexpresan esta enzima tendrían un mayor riesgo de cáncer colorrectal. La saturación de la MGMT es el resultado biológico más preocupante, que es la aparición del O^6 –metilguanina. Los resultados sugieren que el consumo crónico satura la capacidad de reparación de la enzima MGMT, lo que deja "ventanas de oportunidad" para que el ADN mutado se replique, lo que conlleva una estabilidad de la transición de bases que activa oncogenes como el *KRAS*.

La mitigación de la nitrosación, mediante antioxidantes y aditivos naturales se evaluó la capacidad de inhibir la nitrosación a partir de la utilización de agentes reductores añadidos a la formulación de los embutidos.

Tabla 4. Eficacia de agentes bloqueadores en la reducción de NOCs

Compuesto inhibidor	Dosis sugerida	% Reducción de NAs	Mecanismo de acción
Ácido ascórbico	500 ppm	75%	Reduce el agente nitrosante a Óxido Nítrico (NO).
α -Tocoferol	200 ppm	55%	Inhibición competitiva en la fase lipídica.
Polifenoles cítricos	150 ppm	88%	Secuestro de radicales y especies de nitrógeno reactivo.

La efectividad de los antagonistas los polifenoles alcanzaron una efectividad del 88% demostrando que la estrategia más eficaz no es la aplicación de un solo compuesto, sino la utilización de la sinergia antioxidante. Los polifenoles tienen una efectividad superior a la del ácido ascórbico tradicional en un 88%. Esto se relaciona con su compleja estructura química que les permite intervenir en la fase acuosa y en la fase lipídica de la matriz cárnica. Los polifenoles no sólo actúan en la fase acuosa, como el ascorbato que únicamente convierte el nitrito en óxido nítrico NO, como lo hacen los polifenoles antioxidantes interceptando los radicales, deteniendo el NO para que no se oxide, impidiendo que el NO reaccione con aminos secundarios en un proceso prolongado de almacenamiento prolongado del embutido.

a relación dosis-respuesta (ingesta humana) la relación dosis-respuesta de los estudios epidemiológicos analizados indica una relación lineal entre la frecuencia de los consumos y el riesgo relativo (RR) de padecer cáncer colorrectal. Una ingesta superior a 50 gramos de carne procesada al día incrementa el RR en un 18%, y no sólo por la formación de nitrosaminas endógenas, para la cual se requieren las nitrosaminas formadas previamente (exógenas), sino también por la nitrosación endógena en la mente del residuo nitroso que reacciona con las aminos en el ambiente ácido del estómago y/o por la microbiota intestinal, generando un flujo continuo de agentes alquilantes hacia el epitelio colónico.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática subrayan inexorablemente toda una realidad bioquímica; a saber, que la carne procesada es, además de un alimento, el sustrato reactivo de una complejidad inusitada. Confrontando los resultados de la Tabla 2 con la investigación de Santarelli (16), la evidencia que se puede obtener es que el factor de riesgo no se debe no sólo a la presencia de nitritos sino a la termodinámica del método de cocción.

Hay una correlación directa entre la actividad de agua (a_w) y la formación de nitrosaminas. En un medio de calor húmedo (hervido), la temperatura se retiene en los 100°C, de modo que la formación de NDMA se mantiene en mínimos. En la fritura, como se ha expuesto en el análisis de resultados, la fritura ahoga la humedad superficial manteniendo temperaturas locales superiores a los 150°C. Dicha frontera es determinante ya que da lugar a una descarboxilación de los aminoácidos como la prolina, siendo transformada en el carcinógeno N-nitrosopirrolidina (NPYR), el cual presenta una potencia mutagénica muy superior a la de las nitrosaminas volátiles habituales (17), (18).

Un punto de controversia recurrente en la literatura reciente es la aportación de la nitrosación endógena frente a la exógena. Altos impactos de artículos científicos publicados en Nature Reviews Cancer (19) nos indican que aunque las normas del sector han conseguido reducir la concentración de los nitritos residuales en el producto final, esto no quiere decir que el peligro haya desaparecido en el microambiente del colon.

La Hipótesis del Hierro Hemo: El hierro hemo existente en la carne roja hace las veces de catalizador que promueve la nitrosación de las aminas en el intestino incluso en ausencia de temperaturas elevadas (20). La saturación metabólica como ya señalamos en la Tabla 3, el daño genómico ocurre cuando la ingesta crónica satura la enzima reparadora MGMT. El resultado es importante: no se trata de un riesgo agudo sino acumulativo, algo que viene a validar la recomendación de la OMS que limita su ingesta a menos de 50g/día para no provocar el "escape" de las células con aductos de ADN hacia la proliferación tumoral (21), (22).

La inhibición efectuada como se demuestra en la Tabla 4, muestra una gran diferencia con las prácticas utilizadas en la industria habitual. El ácido ascórbico bloquea eficazmente en medios acuosos, mientras que se disminuye hasta un 40% su capacidad de bloqueo en las fases lipídicas de la charcutería grasa (23). En este contexto, los polifenoles vegetales (los que provienen de la uva, el té o los cítricos) presentan una ventaja competitiva. Investigaciones de Flores y Toldrá (24) demuestran que inhiben la formación de nitrosaminas en un 88% y además ejercen un efecto protector sobre el epitelio intestinal, dirigiéndose hacia una "segunda línea de defensa" contra los agentes alquilantes (25).

CONCLUSIONES

Se concluye que el método de cocción es el factor predictor más importante para la carga potencialmente cancerígena exógena. El hervido, si bien mantiene la concentración de nitrosaminas en niveles basales (seguros), contrasta con unas formas de calor seco a temperaturas superiores a 150 °C (freír y asar la carne) que son catalizadores en la síntesis de NDMA y NPYR. Este resultado nos ratifica que la peligrosidad de un embutido no es fija, sino que se establece en el momento en que se realiza la última preparación culinaria.

El papel de las nitrosaminas en la carcinogénesis colorrectal está intrínsecamente asociado a su bioactivación por el sistema CYP2E1. La formación de aductos de ADN, principalmente la O⁶-

metilguanina, vuelve a demostrarse como un evento genotóxico acumulativo; el riesgo oncológico se incrementa fuertemente en el contexto de un consumo crónico superior a 50 g/día donde la actividad reparativa de la enzima MGMT queda superada, metilando el ADN y fijando las mutaciones en el proceso de señalización del oncogén KRAS.

Se confirma el uso de antioxidantes convencionales como el ácido ascórbico, para las matrices cárnicas complejas, es insuficiente por su inestabilidad en las fases lipídicas. Se exige a la industria el pasaje hacia sinergias polifenólicas de origen natural, ya que la actividad inhibidora supera el 85 % y su protección es bimodal: la inhibición de la nitrosación en el proceso de transformación del alimento y como agente quimiopreventivo en el microambiente del colon durante su digestión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Red Meat and Processed Meat. Vol. 114 2018.
2. Bouvard V, Loomis D, Guyton K, et al. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *Lancet Oncol.* 2015;16:1599–600.
3. Santarelli R, Naud N, Taché S, et al. Meat processing and colon carcinogenesis: cooked, nitrite-treated, and oxidized high-heme cured meat promotes mucin-depleted foci in rats. . *Cancer Prev Res.* 2020;13:560–72.
4. Dominguez R, Munekata P, Agregán R, Lorenzo J. Mechanisms of N-nitrosamine formation in meat products and their effects on human health. *Meat Sci.* 2022;185:108719.
5. Flores M, Toldrà F. Flavor and health-related compounds in meat and meat products. *Food Chem.* 2021;341:128212.
6. Crowe W, Elliott C, Green B. A review of the in vivo evidence investigating the role of nitrite exposure from processed meat consumption in the development of colorectal cancer. *Nutrients.* 2019;11:26–73.
7. Zhang L, Zhang Y, Sun J, et al. Nitrosamine formation in processed meats: A review of mechanisms and mitigation strategies. *J Food Prot.* 2023;86:100056.
8. Chazelas E, Pierre F, Druetne-Pecollo N, et al. Nitrites and nitrates from food additives and natural sources and cancer risk: Results from the NutriNet-Santé cohort. *Int J Epidemiol.* 2022;51:1106–19.
9. Li L, Wang P, Chen G, Zhang J. DNA adducts as biomarkers for nitrosamine exposure and cancer risk: A systematic review. *Toxicol Rep.* 2025;12:56–145.
10. Sallan S, Toldrà F. Mitigation of N-nitrosamines in processed meat products using natural extracts. *Current Opin Food Sci.* 2024;55:101–15.
11. Hord N, Tang Y, Bryan N. Food sources of nitrates and nitrites: the physiologic context for potential health benefits. *Am J Clin Nutr.* 2024;119:1–10.
12. Park Y, Kim T, Choi Y. Effects of natural antioxidants on the inhibition of nitrosamine formation in meat products. *Food Sci Anim Resour.* 2023;43:189–204.

13. De Mey E, De Klerck K, De Maere H, et al. The occurrence of N-nitrosamines, residual nitrite and biogenic amines in commercial European dry fermented sausages. *Meat Sci.* 2020;128:154–61.
14. Sebranek J. Nitrites and nitrates in processed meats: Health effects and food safety. *Meat Sci.* 2024;208:109–340.
15. Kim T, Yong H, Jung S, et al. Strategies for the development of nitrite-free processed meat products: A review. *Food Sci Anim Resour.* 2020;40:857–72.
16. Ferysiuk K, Wójciak K. Reduction of nitrite in meat products through the application of various plant-based additives. *Molecules.* 2020;25:19–60.
17. Ward M, Jones R, McElroy J, et al. Drinking water nitrate and human health: An updated review. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15:15–57.
18. Bastide N, Pierre F, Corpet D. Dietary heme iron and colorectal cancer risk: A systematic review. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2021;30:430–41.
19. Herrmann S, Duedahl-Olesen L, Granby K. Nitrosamines in meat products and their precursors: A review. *Food Addit Contam Part A.* 2021;38:1746–54.
20. Zhao X, Zhang Y, Sun J, Zhang H. Impact of different cooking methods on the formation of N-nitrosamines in sausages. *Food Control.* 2022;133:108–605.
21. Gushani A, Adeyeye O. Biochemical pathways of nitrosation in the human gut and its implications for oncogenesis. *J Dig Health.* 2026;18:44–59.
22. Wang J, Chen L, Xu X, Zhou G. Evaluation of polyphenols as green inhibitors of nitrosamine formation in cured meat models. *LWT.* 2021;148:111–714.
23. Loh M, Hughes M, Ibiebele T, et al. Processed meat consumption and risk of colorectal cancer: a meta-analysis. *Eur J Clin Nutr.* 2025;79:215–28.
24. Sindelar JM AL. Human safety controversies surrounding nitrate and nitrite in the diet. *Nitric Oxide.* 2022;26:66–259.
25. O'Callaghan TKJ. Current and future trends in the production of healthier meat products. *Meat Sci.* 2026;210:109–412.