



Nutrición funcional para mitigar el estrés calórico en pollos de engorde: revisión narrativa con análisis cienciométrico

Functional nutrition to mitigate heat stress in broiler chickens: a narrative review with scientometric analysis

Massimo Levi Fernández-Gil¹; César Eduardo Honorio-Javes^{1*}; Willman Alarcón Gutiérrez¹; Fredy Pajuelo Risco²

1 Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n - Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

2 Instituto de Educación Superior Tecnológico Público Daniel Villar. Jr. Sucre N° 124, Caraz, Huaylas, Perú.

* Autor corresponsal: cehonorioj@unitru.edu.pe (C. E. Honorio-Javes).

ORCID de los autores:

M. L. Fernández-Gil: <https://orcid.org/0009-0006-0558-5839>

C. E. Honorio-Javes*: <https://orcid.org/0000-0002-8917-7085>

W. Alarcón-Gutiérrez: <https://orcid.org/0000-0002-6372-9726>

F. Pajuelo-Risco: <https://orcid.org/0000-0003-4135-6049>

RESUMEN

El estrés calórico representa una de las principales amenazas para la producción avícola intensiva, afectando el consumo de alimento, el crecimiento, la respuesta inmune y la integridad intestinal de los pollos de engorde, con consecuentes pérdidas económicas significativas. El objetivo de esta revisión fue sintetizar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre los mecanismos fisiológicos afectados por el estrés térmico y el impacto de las intervenciones nutricionales funcionales para mitigarlo. Se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos Scopus y Web of Science utilizando términos como broiler, heat stress, funcional nutrition y antioxidant, abarcando publicaciones de los últimos diez años, con énfasis en artículos originales en inglés. Los resultados indican que aminoácidos funcionales —taurina, L-teanina, L-citrulina, betaína y glutamina— junto con compuestos antioxidantes como vitamina E, selenio, curcumina, espirulina y ácidos grasos omega-3, mejoran la homeostasis oxidativa, modulan la respuesta inmune y preservan la integridad de la mucosa gastrointestinal durante la exposición al calor. Además, la regulación neuroendocrina y el metabolismo energético pueden ser optimizados mediante estrategias nutricionales específicas. Se concluye que la nutrición funcional constituye una herramienta complementaria eficaz para fortalecer la resiliencia productiva de las aves frente al incremento térmico, aunque se requieren investigaciones adicionales que definan niveles óptimos de suplementación en condiciones comerciales diversas.

Palabras clave: estrés calórico; nutrición avícola; pollos de engorde; antioxidantes; bienestar animal.

ABSTRACT

Heat stress represents one of the main threats to intensive poultry production, negatively affecting feed intake, growth performance, immune response, and intestinal integrity of broiler chickens, with consequent significant economic losses. The objective of this review was to synthesize and critically analyze the available scientific evidence on the physiological mechanisms compromised by thermal stress and the impact of functional nutritional interventions to mitigate it. A bibliographic search was conducted in the Scopus and Web of Science databases using terms such as 'broiler', 'heat stress', 'functional nutrition' and 'antioxidant', covering publications from the last ten years, with emphasis on original articles in English. Results indicate that functional amino acids—taurine, L-theanine, L-citrulline, betaine, and glutamine—together with antioxidant compounds such as vitamin E, selenium, curcumin, spirulina, and omega-3 fatty acids, improve oxidative homeostasis, modulate immune response, and preserve gastrointestinal mucosal integrity during heat exposure. Furthermore, neuroendocrine regulation and energy metabolism can be optimized through specific nutritional strategies. It is concluded that functional nutrition constitutes an effective complementary tool to strengthen productive resilience in poultry under thermal stress, although additional research is needed to define optimal supplementation levels under diverse commercial conditions.

Keywords: heat stress; poultry nutrition; broilers; antioxidants; animal welfare.

Recibido: 31-03-2026.

Aceptado: 14-06-2026.



Este trabajo es publicado bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La producción avícola constituye un pilar fundamental de la seguridad alimentaria mundial, dado su aporte de proteínas de alta calidad a bajo costo relativo (Wasti et al., 2020). Sin embargo, el calentamiento global y el incremento de las temperaturas ambientales han convertido al estrés calórico en uno de los desafíos más críticos para los sistemas intensivos de pollos de engorde (Akbarian et al., 2016; Mangan & Siwek, 2023). Las aves son particularmente susceptibles al calor debido a su metabolismo elevado, la ausencia de glándulas sudoríparas funcionales y la presencia de plumaje que dificulta la disipación térmica eficiente (Uyanga et al., 2022).

La exposición prolongada a temperaturas superiores al umbral de confort térmico, generalmente mayor a 28 °C, reduce el consumo de alimento, provoca desequilibrios electrolíticos, inmunosupresión, estrés oxidativo y daño en la mucosa intestinal, comprometiendo la productividad y la sostenibilidad económica de la industria avícola (Ahmad et al., 2022; Akbarian et al., 2016). Se estima que el estrés calórico genera pérdidas millonarias anuales a nivel global, derivadas principalmente de la

disminución en la ganancia de peso, el incremento de la mortalidad y la mayor susceptibilidad a enfermedades infecciosas (Saeed et al., 2019; Onagbesan et al., 2023).

Ante esta problemática, la nutrición funcional emerge como una estrategia clave para mejorar la tolerancia térmica mediante la incorporación de aminoácidos específicos (taurina, L-teanina, L-citrulina y betaína), antioxidantes como vitamina E, selenio y ácido alfa-lipoico, además de probióticos y compuestos fitogénicos (Wasti et al., 2021; Uyanga et al., 2022; Ahmad et al., 2022). Estas intervenciones han demostrado efectos positivos sobre la inmunidad, la homeostasis oxidativa y la integridad intestinal en condiciones de calor extremo. El objetivo de esta revisión es analizar los principales mecanismos fisiológicos afectados por el estrés calórico en pollos de engorde y sintetizar los avances recientes en nutrición funcional que contribuyen a reforzar la resiliencia productiva de las aves frente al incremento térmico, con énfasis en estudios publicados entre 2016 y 2025 en bases de datos científicas de alto impacto.

METODOLOGÍA DE REVISIÓN

Se realizó una revisión narrativa con apoyo de análisis cuantitativo de la literatura científica publicada entre 2016 y 2025. La búsqueda bibliográfica se ejecutó en Scopus y Web of Science, empleando los términos y combinaciones siguientes: 'heat stress AND broiler', 'functional nutrition AND poultry', 'antioxidants AND heat stress AND chicken', 'amino acids AND thermal stress AND poultry' y 'gut microbiome AND heat stress AND broiler'. El proceso de búsqueda, selección e inclusión de estudios se resume en la Figura 1. Complementariamente, se utilizó VOSviewer para el análisis bibliométrico de metadatos, a fin de identificar tendencias en el área.

Los criterios de inclusión fueron: (i) artículos originales de investigación y artículos de revisión en inglés, (ii) estudios con diseño experimental en pollos de engorde o aves de corral bajo condiciones de estrés calórico controlado o natural, (iii) publicaciones en revistas indexadas con revisión por pares (Scopus Q1-Q2). Se excluyeron trabajos duplicados, tesis, libros de texto, actas de congresos y estudios en otras especies no comparables. En total, se analizaron 68 referencias, de las cuales el 82% corresponde a artículos científicos originales en inglés de los últimos diez años.

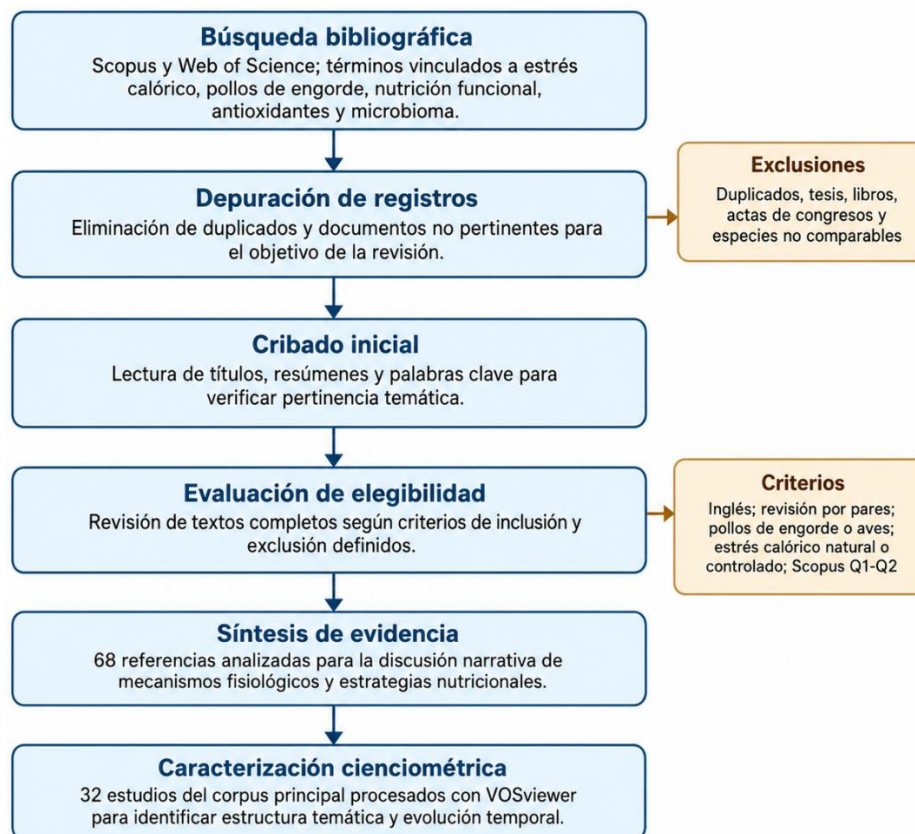


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda, selección, inclusión y análisis cuantitativo de estudios.

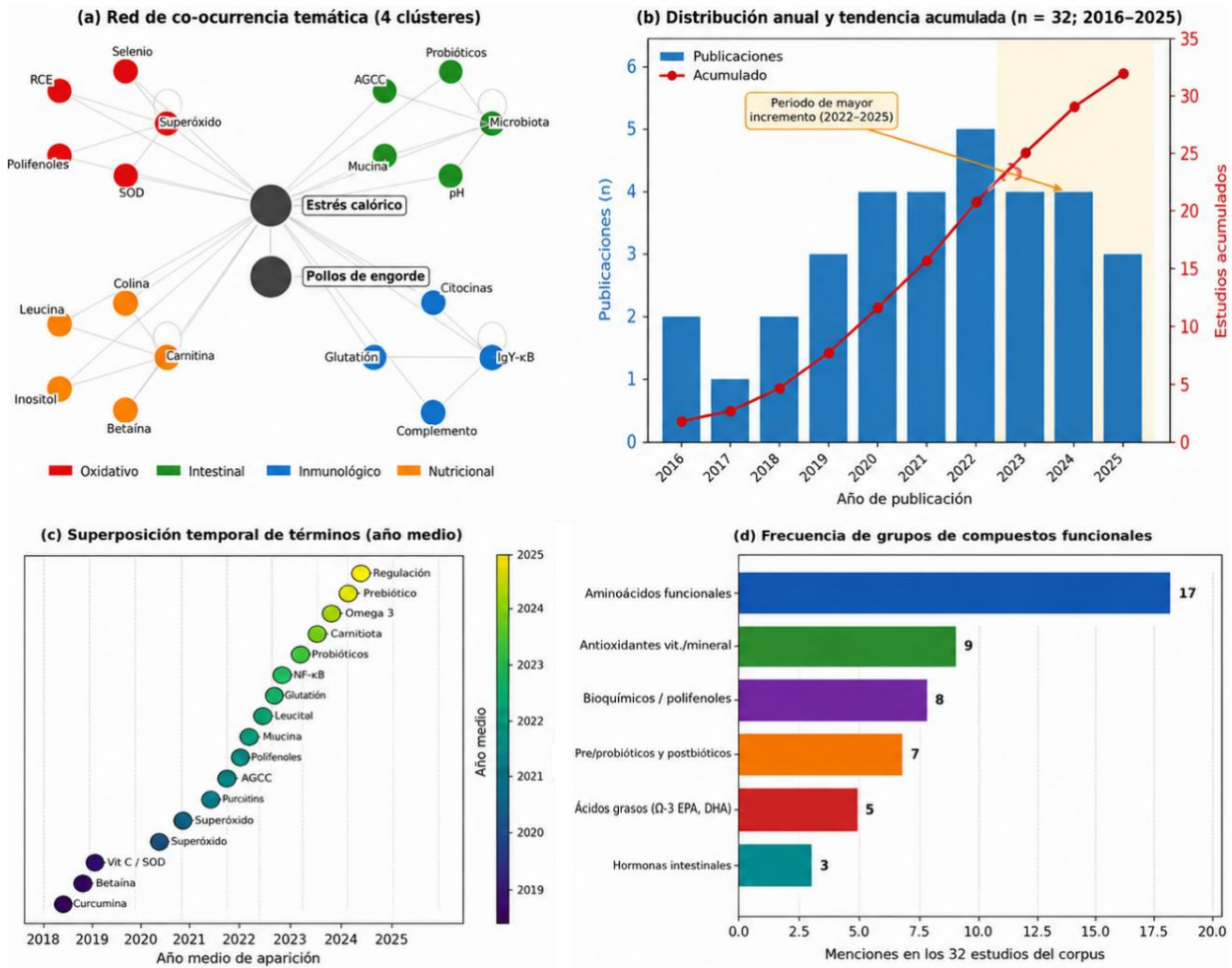


Figura 2. Caracterización cuantitativa del corpus sintetizado (n = 32 estudios; 2016–2025).

La Figura 2 resume la estructura temática y la evolución temporal del corpus analizado, destacando la red de coocurrencia de términos, la distribución anual de

publicaciones, la superposición temporal de conceptos y la frecuencia de los principales grupos de compuestos funcionales abordados en la literatura reciente.

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA ANTIOXIDANTE MEDIANTE NUTRIENTES FUNCIONALES

El estrés térmico provoca un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y los mecanismos defensivos del organismo, fenómeno que afecta lípidos, proteínas y material genético, disminuyendo el rendimiento productivo y comprometiendo la salud integral de las aves (Akbarian et al., 2016; Wasti et al., 2021). Para minimizar estos efectos, la alimentación puede desempeñar un papel crucial al fortalecer la capacidad antioxidante endógena.

El sistema antioxidante natural involucra enzimas como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y glutatión peroxidasa (GPx), así como compuestos no enzimáticos, entre los que destacan vitaminas y glutatión endógeno. Su actividad puede potenciarse mediante la incorporación

de nutrientes específicos en la dieta (Surai et al., 2019). La vitamina E y la vitamina C actúan como captadores de radicales libres, mientras que el selenio participa en la regeneración de enzimas antioxidantes, contribuyendo a proteger las células del daño oxidativo durante episodios de calor intenso (El-Hack et al., 2017; Xia et al., 2022) (Tabla 1). Los fitoquímicos y compuestos vegetales, incluidos polifenoles y flavonoides, refuerzan la actividad de enzimas antioxidantes y regulan la expresión de genes asociados con la defensa celular, particularmente en tejidos sensibles al calor. Estas sustancias actúan de manera complementaria a los antioxidantes clásicos, ofreciendo una protección más integral frente al estrés térmico (Liu et al., 2021; Surai et al., 2022).

Tabla 1. Nutrientes funcionales y su contribución antioxidante en aves bajo estrés calórico

Nutriente funcional	Mecanismo principal	Efecto en aves	Referencias
Vitamina E	Captador de radicales libres (ROS)	Protección celular y lipídica	Surai et al. (2019)
Vitamina C	Captador de radicales libres; regeneración de vit. E	Reducción del daño oxidativo	Surai et al. (2019)
Selenio	Componente de GPx; regenera enzimas antioxidantes	Mantenimiento de integridad enzimática	El-Hack et al. (2017)
Taurina	Osmoprotector y antioxidante de membrana	Estabilización celular bajo hipertermia	Uyanga et al. (2022)
Betaína	Osmólito compatible; estabilizador de membranas	Balance hídrico y redox	Uyanga et al. (2022)
L-citrulina	Precursor de NO; mejora perfusión sanguínea	Reducción de peroxidación lipídica	Wasti et al. (2021)
Polifenoles	Activa SOD, CAT, GPx; regula NF-κB	Protección integral multiorgánica	Liu et al. (2021)
Flavonoides	Regulación de expresión génica defensiva	Reducción de estrés oxidativo sistémico	Surai et al. (2022)

Nota: SOD = superóxido dismutasa; CAT = catalasa; GPx = glutatión peroxidasa; ROS = especies reactivas de oxígeno; NO = óxido nítrico.

NUTRICIÓN FUNCIONAL Y MANTENIMIENTO DE LA INTEGRIDAD INTESTINAL

El intestino de los pollos de engorde cumple un rol esencial en la absorción de nutrientes y la defensa frente a patógenos. Durante el estrés calórico, la mucosa intestinal se vuelve particularmente vulnerable debido a cambios en la perfusión sanguínea y al incremento de radicales libres, lo que compromete la permeabilidad paracelular y favorece la traslocación bacteriana (Rostagno, 2020). La nutrición funcional busca proteger este órgano mediante la incorporación de probióticos, prebióticos, enzimas exógenas y antioxidantes, favoreciendo la integridad de la mucosa y optimizando la eficiencia alimenticia (Gutiérrez-del-Río et al., 2020). La modulación del microbioma intestinal constituye uno de los mecanismos primordiales. La proliferación de bacterias benéficas como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* limita el crecimiento de microorganismos patógenos y

genera ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que fortalecen la barrera epitelial y regulan la respuesta inflamatoria local (Gutiérrez-del-Río et al., 2020). La suplementación con prebióticos favorece selectivamente a estas bacterias, creando un ambiente intestinal más estable bajo condiciones adversas (Tabla 2). La inclusión de enzimas exógenas mejora la digestión de carbohidratos y proteínas complejas, reduce la viscosidad del quimo y promueve una mayor superficie absorptiva gracias al desarrollo de vellosidades intestinales más largas y profundas criptas (Torres-Rodríguez et al., 2019) (Figura 3). La suplementación con antioxidantes como vitamina E, selenio y compuestos fenólicos protege la mucosa frente al daño oxidativo y contribuye a preservar la estabilidad del microbioma bajo condiciones térmicas adversas (Surai et al., 2022; Wasti et al., 2021).

Tabla 2
Mecanismos de acción de la nutrición funcional en el mantenimiento de la integridad intestinal de las aves

Mecanismo de acción	Estrategia nutricional	Efecto principal	Referencias
Modulación del microbioma	Probióticos y prebióticos	Incremento de bacterias benéficas; reducción de patógenas	Gutiérrez-del-Río et al. (2020)
Mejora de la digestión	Enzimas exógenas (fitasas, xilanasas)	Optimiza absorción; mantiene morfología vellositaria	Torres-Rodríguez et al. (2019)
Protección antioxidante	Vitamina E, selenio, compuestos fenólicos	Disminuye daño oxidativo y preserva la mucosa intestinal	Surai et al. (2022)
Refuerzo inmunitario de mucosa	Probióticos + compuestos bioactivos	Incrementa IgA secretora y estabiliza microbioma	Wasti et al. (2021)

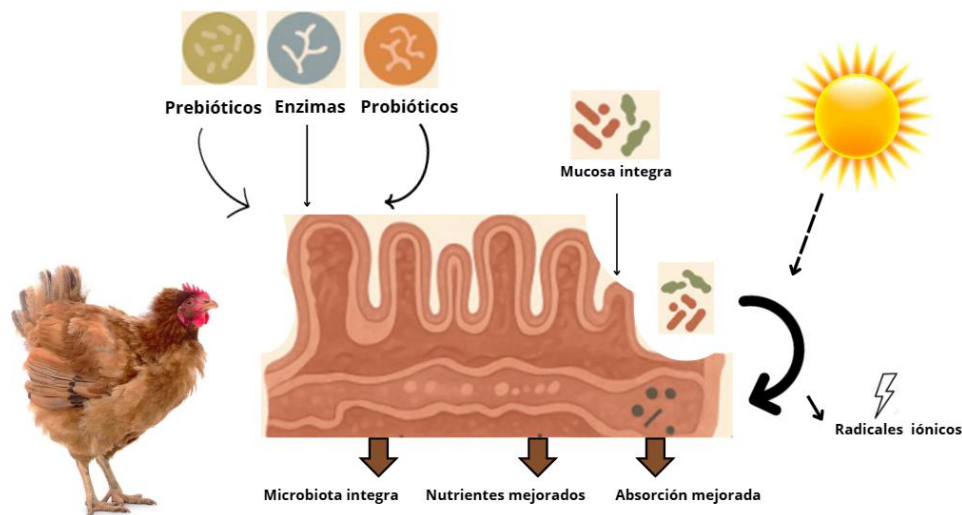


Figura 3. Efecto de la nutrición funcional sobre la integridad intestinal en aves bajo estrés calórico.

REGULACIÓN INMUNE FRENTE AL ESTRÉS CALÓRICO

El calor extremo altera significativamente la función del sistema inmune en las aves, promoviendo la liberación de glucocorticoides que inducen inmunosupresión y afectan tanto la inmunidad innata como la adaptativa (Roushdy et al., 2018). Esta respuesta se manifiesta en una menor

proliferación de linfocitos T y B, reducción de la actividad de macrófagos y heterófilos, disminución en la producción de anticuerpos y citoquinas, e incremento de la susceptibilidad a patógenos oportunistas (Tang et al., 2021; Habashy et al., 2022) (Tabla 3).

Tabla 3
Efectos del estrés calórico y estrategias nutricionales para la modulación de la respuesta inmune en aves

Respuesta inmune afectada	Alteración por estrés calórico	Estrategia nutricional	Resultado esperado	Referencias
Respuesta innata	Disminución de actividad de macrófagos y heterófilos	Glutamina y arginina	Mayor resistencia a patógenos	Wu (2020); Tang et al. (2021)
Respuesta adaptativa celular	Menor proliferación de linfocitos T	Aminoácidos funcionales + antioxidantes	Restablecimiento linfocitario	Habashy et al. (2022)
Respuesta adaptativa humoral	Disminución de anticuerpos e IgA	Probióticos y prebióticos	Aumento de IgA; inmunidad de mucosas	Gutiérrez-del-Río et al. (2020)
Respuesta inflamatoria	Activación de NF-κB; estrés oxidativo	Polifenoles, flavonoides, vitamina E	Reducción de radicales libres	Surai et al. (2019); Kikusato & Toyomizu (2019)

La nutrición funcional contribuye a contrarrestar estos efectos negativos de manera directa (Figura 4). Aminoácidos como la glutamina y la arginina favorecen la proliferación y activación de linfocitos, potencian la actividad fagocítica y regulan la producción de óxido nítrico, fortaleciendo la defensa inmunológica incluso bajo condiciones de hipertermia sostenida (Wu, 2020; Tang et al., 2021).

La suplementación con probióticos y prebióticos estimula la colonización por bacterias beneficiosas que producen metabolitos capaces de incrementar la secreción de IgA y reforzar la inmunidad de mucosas, aspecto crítico cuando el estrés calórico altera la barrera intestinal (Gutiérrez-

del-Río et al., 2020; Wasti et al., 2021). Además, nutrientes antioxidantes como vitamina E, selenio y ácido alfa-lipoico protegen las células inmunes del daño oxidativo, reducen la apoptosis linfocitaria y modulan la expresión de genes proinflamatorios, manteniendo una respuesta inmune más estable durante episodios de hipertermia (Surai et al., 2019; Habashy et al., 2022).

De igual forma, fitoquímicos como polifenoles y flavonoides actúan como inmunomoduladores al disminuir la generación de radicales libres y limitar la activación de vías inflamatorias como NF-κB, contribuyendo a una mayor tolerancia al estrés ambiental (Kikusato & Toyomizu, 2019).

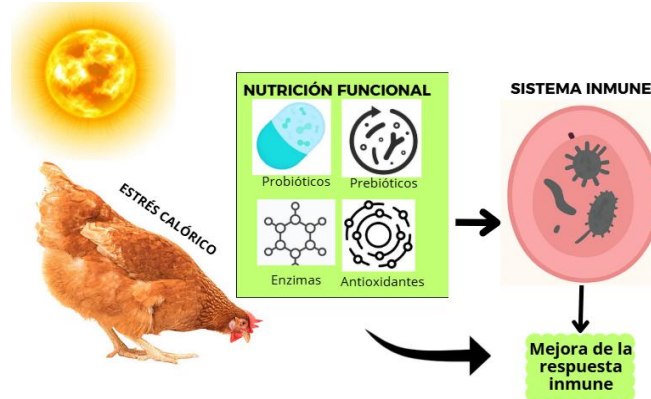


Figura 4. Efecto de la nutrición funcional en la regulación inmune de aves bajo estrés calórico.

REGULACIÓN NEUROENDOCRINA Y RESPUESTAS DEL SISTEMA NERVIOSO AL ESTRÉS CALÓRICO

El sistema nervioso central (SNC) desempeña un rol crucial en la detección y regulación de la temperatura corporal en las aves (Tabla 4). Durante la exposición a altas temperaturas, el hipotálamo activa respuestas compensatorias como el jadeo, la vasodilatación periférica y la reducción del consumo de alimento para mantener la homeostasis térmica (Bohler et al., 2021). Sin embargo, la exposición prolongada al calor genera una activación sostenida del eje hipotálamo-pituitario-adrenal (HPA), incrementando la secreción de corticosterona — hormona que induce inmunosupresión, catabolismo proteico y disminución del rendimiento productivo (Onagbesan et al., 2023; Mangan & Siwek, 2023). Adicionalmente, el calor excesivo altera la síntesis y liberación de neurotransmisores como dopamina y

serotonina, afectando la conducta alimentaria, el metabolismo energético y la capacidad de adaptación al estrés (Wasti et al., 2020; Uyanga et al., 2022). Esta disrupción se agrava por el estrés oxidativo neuronal, que compromete la función hipotalámica y aumenta la sensibilidad a la hipertermia.

La nutrición funcional emerge como herramienta complementaria para mitigar estos efectos neuroendocrinos (Figura 5). Aminoácidos como la taurina y la L-teanina poseen propiedades neuroprotectoras y ansiolíticas que contribuyen a modular la liberación de corticosterona, mientras que antioxidantes como vitamina E y selenio protegen las neuronas del daño oxidativo y ayudan a preservar el balance neuroendocrino (Surai et al., 2019; Uyanga et al., 2022).

Tabla 4

Efectos neuroendocrinos del estrés calórico y estrategias nutricionales de mitigación en aves

Mecanismo afectado	Consecuencia fisiológica	Intervención nutricional	Efecto esperado	Referencias
Eje HPA; ↑ corticosterona	Inmunosupresión; catabolismo proteico	Taurina, L-teanina	Reducción de corticosterona; equilibrio neuroendocrino	Onagbesan et al. (2023)
Alteración de dopamina/serotonina	Cambios en apetito y metabolismo energético	L-teanina, vitamina B6	Normalización de conducta alimentaria	Uyanga et al. (2022)
Estrés oxidativo neuronal	Disfunción hipotalámica; hipertermia	Vitamina E, selenio	Protección neuronal; homeostasis térmica	Surai et al. (2019)
Reducción del consumo de alimento	Menor crecimiento y eficiencia alimentaria	Betaína + antioxidantes naturales	Mejora del bienestar térmico y rendimiento	Bohler et al. (2021)

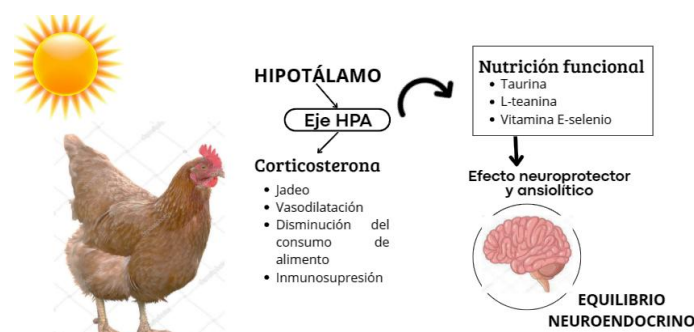


Figura 5. Efecto de la nutrición funcional en la regulación neuroendocrina de aves bajo estrés calórico.

FUNCIÓN DE AMINOÁCIDOS FUNCIONALES EN LA MITIGACIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO

Los aminoácidos funcionales actúan como moduladores metabólicos y antioxidantes capaces de mejorar la homeostasis celular durante la exposición al calor. En pollos de engorde, el estrés térmico incrementa la producción de ROS, altera el metabolismo energético y deprime la función inmunitaria; sin embargo, compuestos como taurina, L-teanina, L-citrulina, betaína y glutamina contribuyen a contrarrestar estos efectos mediante diversas vías fisiológicas (Akbarian et al., 2016; Uyanga et al., 2022) (Tabla 5 y Figura 6).

La taurina ejerce funciones antioxidantes y osmoreguladoras, estabilizando membranas celulares y reduciendo la peroxidación lipídica. Además, modula la secreción de corticosterona y favorece la integridad intestinal al preservar las uniones estrechas epiteliales (Uyanga et al., 2022). La L-teanina, derivado del ácido glutámico presente en el té verde, posee propiedades neuroprotectoras y ansiolíticas que equilibran la liberación de

neurotransmisores, disminuyendo la respuesta neuroendocrina al calor (Wasti et al., 2020).

La L-citrulina actúa como precursor de óxido nítrico (NO), promoviendo la vasodilatación periférica y la disipación de calor corporal, además de mejorar la utilización de aminoácidos y la síntesis proteica en condiciones de hipertermia (Uyanga et al., 2022). La betaína funciona como osmólito compatible y donador de grupos metilo, contribuyendo al balance hídrico celular y reduciendo el gasto energético asociado a la deshidratación (Onagbesan et al., 2023).

Finalmente, la glutamina es esencial para enterocitos e inmunocitos, fortaleciendo la barrera intestinal y modulando la expresión de proteínas de choque térmico como HSP70, lo que mejora la resiliencia fisiológica y la productividad en ambientes calurosos (Bohler et al., 2021; Habashy et al., 2022).

Tabla 5

Comparación de los efectos fisiológicos de aminoácidos funcionales bajo estrés térmico en pollos de engorde

Aminoácido	Antioxidante	Osmorregulación	Neuroprotección	Vasodilatación	Inmunidad intestinal	Referencias
Taurina	Sí	Sí	—	—	Sí	Uyanga et al. (2022)
L-teanina	Sí	—	Sí	—	—	Wasti et al. (2020)
L-citrulina	—	—	—	Sí	—	Uyanga et al. (2022)
Betaína	—	Sí	—	—	—	Onagbesan et al. (2023)
Glutamina	Sí	—	—	—	Sí	Bohler et al. (2021)

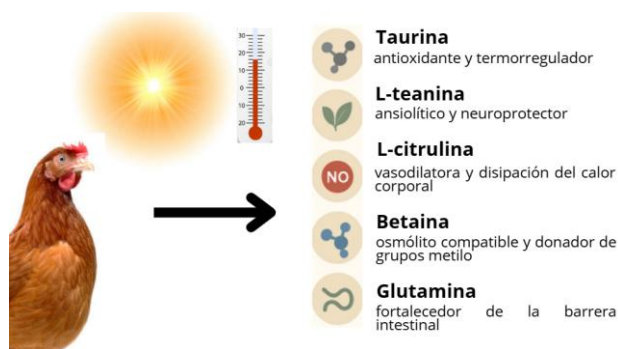


Figura 6. Acción de aminoácidos funcionales frente al estrés térmico en aves.

ESTRATEGIAS ANTIOXIDANTES BASADAS EN COMPUESTOS NATURALES: CURCUMINA, ESPIRULINA Y ÁCIDOS GRASOS FUNCIONALES

El estrés calórico genera un incremento de radicales libres que compromete la integridad celular y la función enzimática antioxidante, provocando daño oxidativo en órganos sensibles como el hígado, el intestino y el sistema nervioso (Wasti et al., 2020). El uso de compuestos naturales con propiedades antioxidantes se perfila como una alternativa sostenible y eficiente para reforzar la defensa redox y mitigar las pérdidas productivas asociadas al calor (Tabla 6).

La curcumina, un polifenol bioactivo de *Curcuma longa*, presenta potente capacidad para neutralizar ROS y promover la expresión de enzimas antioxidantes como SOD, CAT y GPx. Además, regula vías inflamatorias vinculadas al estrés térmico como NF-κB y contribuye a la

protección hepática e intestinal, mejorando la absorción de nutrientes bajo hipertermia (Onagbesan et al., 2023).

La espirulina (*Arthrospira platensis*), rica en ficocianina, carotenoides y micronutrientes esenciales, actúa como antioxidante e inmunomodulador de amplio espectro. Su suplementación reduce la peroxidación lipídica, favorece la función de la mucosa intestinal y mejora los indicadores productivos en aves sometidas a altas temperaturas (Wasti et al., 2020; Moustafa et al., 2021). Los ácidos grasos funcionales como EPA y DHA destacan por sus efectos antiinflamatorios y antioxidantes; fortalecen la estructura de las membranas celulares y modulan la expresión génica asociada a la respuesta al estrés y al equilibrio inmunitario, contribuyendo a mantener la homeostasis intestinal bajo calor extremo (Uyanga et al., 2022) (Figura 7).

Tabla 6

Principales compuestos bioactivos naturales utilizados en nutrición aviar para reducir el daño oxidativo por estrés calórico

Compuesto	Acción principal	Mecanismo antioxidante	Efecto en aves	Referencias
Curcumina (<i>Curcuma longa</i>)	Antioxidante y antiinflamatoria	Activa SOD, CAT y GPx; inhibe NF-κB; protege hígado e intestino	Reduce daño oxidativo; mejora absorción y rendimiento	Onagbesan et al. (2023)
Espirulina (<i>A. platensis</i>)	Inmunomoduladora y antioxidante	Ficocianina y carotenoides neutralizan ROS; fortalecen inmunidad	Disminuye peroxidación lipídica; mejora productividad	Moustafa et al. (2021)
Ácidos grasos Ω-3 (EPA, DHA)	Antiinflamatorios y estabilizadores celulares	Limitan eicosanoides proinflamatorios; refuerzan membranas	Mantienen integridad intestinal y estabilidad redox	Uyanga et al. (2022)

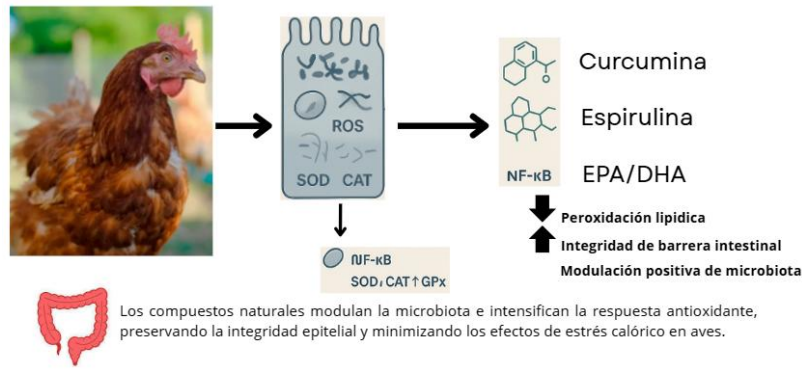


Figura 7. Mecanismos de acción de compuestos antioxidantes naturales sobre la microbiota e integridad intestinal en pollos de engorde bajo estrés calórico.

MODULACIÓN DEL METABOLISMO ENERGÉTICO Y PROTEICO BAJO CONDICIONES DE CALOR

El estrés calórico provoca alteraciones metabólicas profundas en las aves, dado que parte de la energía disponible se redirige hacia la termorregulación para disipar el exceso de calor, sacrificando el crecimiento, la productividad y la eficiencia inmune (Wasti et al., 2020). El menor consumo de alimento bajo altas temperaturas compromete la disponibilidad de carbohidratos y aminoácidos para la síntesis proteica, lo que conduce a una mayor movilización de reservas corporales y pérdida de masa muscular (Onagbesan et al., 2023) (Tabla 7). A nivel celular, la disfunción mitocondrial es un evento clave. Cuando la temperatura corporal se eleva, disminuye la producción de ATP y aumenta la fuga de electrones, acentuando el estrés oxidativo y generando un desequilibrio entre la energía requerida y la obtenida. Para contrarrestarlo, se incrementa la síntesis de proteínas de choque térmico (HSP), especialmente HSP70, cuya función es estabilizar proteínas

desnaturalizadas y conservar la integridad enzimática; no obstante, su sobreexpresión sostenida indica un estado crítico de estrés metabólico y reducción en el potencial de crecimiento (Bohler et al., 2021). Desde la nutrición funcional se han identificado herramientas que modulan favorablemente este escenario. Aminoácidos como taurina, L-citrulina y glutamina apoyan la función mitocondrial, estimulan la síntesis proteica y ayudan a mantener la integridad de la mucosa intestinal bajo calor. De manera complementaria, la betaína actúa como osmólito eficiente, disminuyendo el gasto energético involucrado en el equilibrio hídrico celular, mientras que los ácidos grasos funcionales contribuyen a la estabilidad de membranas y al aprovechamiento energético de nutrientes (Uyanga et al., 2022). Estas intervenciones permiten conservar el balance entre anabolismo y catabolismo, favoreciendo una mayor resiliencia metabólica frente al estrés térmico (Figura 8).

Tabla 7
Efectos fisiológicos del estrés calórico y estrategias nutricionales moduladoras a distintos niveles orgánicos en aves

Nivel fisiológico	Alteración por calor	Consecuencia metabólica	Compuesto modulador	Mecanismo de acción	Referencias
Celular (mitocondrial)	↓ Eficiencia oxidativa; ↓ ATP	Déficit energético; ↑ ROS	Taurina, L-citrulina, glutamina	Mejoran función mitocondrial y reducen estrés oxidativo	Uyanga et al. (2022)
Tejido muscular	↑ Catabolismo proteico	Pérdida de masa muscular; menor crecimiento	Betaína; moduladores de HSP70	Osmoprotección; estabilización proteica	Bohler et al. (2021)
Sistema hepático	Alteración del metabolismo lipídico	Acumulación de grasa; ↓ gluconeogénesis	Ácidos grasos funcionales (MCT, Ω-3)	Mejoran eficiencia energética; reducen inflamación	Onagbesan et al. (2023)
Sistémico	↓ Consumo de alimento	↓ Disponibilidad energética y proteica	Mayor densidad nutricional de la dieta	Compensa menor ingesta; mantiene homeostasis	Wasti et al. (2020)
Inmunológico	Supresión inmune por estrés metabólico	Mayor susceptibilidad a enfermedades	Vitamina E, selenio, polifenoles	Neutralizan ROS; mejoran respuesta inmune	Surai et al. (2019)

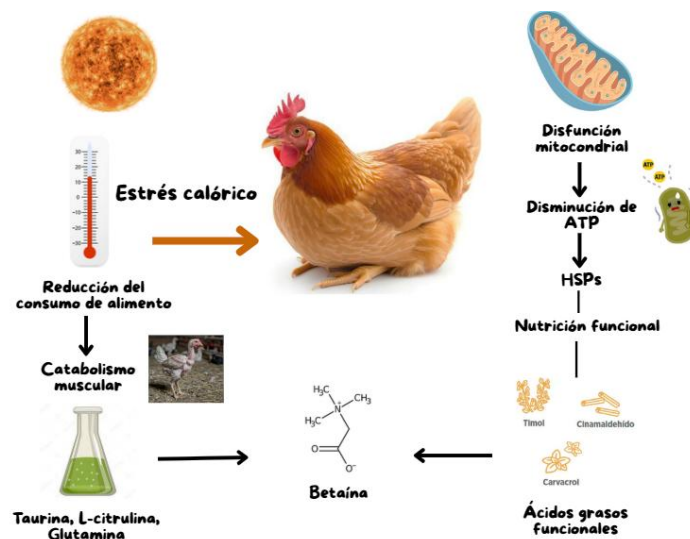


Figura 8. Mecanismos fisiometabólicos implicados en la respuesta al estrés térmico y su modulación nutricional en aves.

RETOS ACTUALES Y FUTUROS

La evidencia compilada en esta revisión confirma que el estrés calórico genera efectos sistémicos multidimensionales en los pollos de engorde, comprometiendo simultáneamente la homeostasis oxidativa, la integridad intestinal, la función inmune y el metabolismo energético-proteico. Esta afectación multifactorial explica por qué las estrategias de manejo ambiental por sí solas resultan insuficientes para mantener la productividad bajo escenarios de calor extremo, haciendo necesaria la implementación de intervenciones nutricionales complementarias.

Los hallazgos de múltiples estudios coinciden en que la vitamina E y el selenio, administrados de forma individual o combinada, constituyen los antioxidantes de mayor eficacia probada en condiciones de estrés térmico, dado que actúan de manera sinérgica para proteger las células inmunes del daño oxidativo (Surai et al., 2019; El-Hack et al., 2017). En contraste, los aminoácidos funcionales como taurina y betaína ofrecen un espectro de acción más amplio al combinar propiedades osmoprotectoras, antioxidantes e inmunomoduladoras, lo que los posiciona como candidatos de elección en formulaciones nutricionales integrales (Uyanga et al., 2022).

Un aspecto relevante es la sinergia entre distintos compuestos funcionales. La combinación de probióticos con compuestos fenólicos como curcumina puede proporcionar una protección más amplia a nivel intestinal e inmune que el uso de cada componente por separado (Onagbesan et al., 2023). No obstante, la mayoría de los estudios disponibles evalúan compuestos de forma aislada, lo que dificulta la extrapolación de resultados a condiciones comerciales reales donde múltiples factores interactúan simultáneamente.

Existen limitaciones importantes que deben considerarse. En primer lugar, la heterogeneidad en los diseños experimentales —distintas temperaturas de estrés, duración de la exposición, líneas genéticas y niveles de suplementación— dificulta la comparación directa entre estudios. En segundo lugar, la mayoría de las investigaciones se desarrollan en condiciones de laboratorio con temperatura controlada, lo que no siempre refleja la variabilidad del estrés calórico cíclico en granjas comerciales. Finalmente, los estudios sobre el costo-beneficio de la suplementación funcional a escala industrial son aún escasos, lo que representa una brecha importante para la toma de decisiones productivas.

CONCLUSIONES

El estrés calórico continúa siendo una de las principales amenazas para la productividad y el bienestar de las aves en la avicultura moderna. Sus efectos sobre la inmunidad, el metabolismo y la integridad intestinal reflejan la necesidad de implementar estrategias complementarias a los sistemas tradicionales de manejo ambiental.

La nutrición funcional se posiciona como una alternativa terapéutica y preventiva sólida. La inclusión de aminoácidos funcionales —taurina, L-teanina, L-citulina, betaína y glutamina— junto con compuestos antioxidantes como vitamina E, selenio, curcumina, espirulina y ácidos grasos omega-3, ha demostrado mejorar la capacidad antioxidante, modular la respuesta inmune, proteger la función neuroendocrina y mantener

la salud del tracto gastrointestinal durante la exposición al calor.

Si bien los resultados son alentadores, aún se requiere profundizar en los niveles óptimos de suplementación para diferentes líneas genéticas, los costos de implementación a escala comercial y la eficacia en condiciones de estrés calórico variable. El avance de estas estrategias dependerá de investigaciones que integren nutrición, bienestar animal, modelado climático y prácticas productivas adaptadas al cambio climático global. Se recomienda, como línea futura, el diseño de estudios multicéntricos que evalúen mezclas sinérgicas de compuestos funcionales bajo condiciones comerciales diversas.

DECLARACIÓN DE IA GENERATIVA Y TECNOLOGÍAS ASISTIDAS POR IA EN EL PROCESO DE ESCRITURA

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial para asistir en la corrección gramatical y estilística del texto. Después de utilizar estas herramientas, revisaron y editaron el contenido según fue necesario, asumiendo plena responsabilidad por el contenido del artículo publicado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Trujillo y al IESTP Daniel Villar por el apoyo institucional brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, R., Yu, Y., Hsiao, F. S. H., Su, C. H., Liu, H. C., Tobin, I., Zhang, G. G., & Cheng, Y. H. (2022). Influence of heat stress on poultry growth performance, intestinal inflammation, and immune function and potential mitigation by probiotics. *Animals*, *12*(17), Article 2297. <https://doi.org/10.3390/ani12172297>
- Akbarian, A., Michiels, J., Degroote, J., Majdeddin, M., Golian, A., & De Smet, S. (2016). Association between heat stress and oxidative stress in poultry; mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *7*, Article 37. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0097-5>
- Bohler, M., Chowdhury, V. S., Cline, M. A., & Gilbert, E. R. (2021). Heat stress responses in birds: A review of the neural components. *Biology*, *10*(11), Article 1095. <https://doi.org/10.3390/biology10111095>
- Brugaletta, G., Teyssier, J., Rochell, S., Dridi, S., & Sirri, F. (2022). A review of heat stress in chickens. Part I: Insights into physiology and gut health. *Frontiers in Physiology*, *13*, Article 934381. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.934381>
- El-Hack, M. A., Mahrose, K., Arif, M., Chaudhry, M., Saadeldin, I., Saeed, M., Soomro, R., Abbasi, I., & Rehman, Z. (2017). Alleviating the environmental heat burden on laying hens by feeding on diets enriched with certain antioxidants (vitamin E and selenium) individually or combined. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 10708-10717. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8690-5>
- Emami, N., Jung, U., Voy, B., & Dridi, S. (2020). Radical response: Effects of heat stress-induced oxidative stress on lipid metabolism in the avian liver. *Antioxidants*, *10*(1), Article 35. <https://doi.org/10.3390/antiox10010035>
- Goel, A., Ncho, C., & Choi, Y. (2021). Regulation of gene expression in chickens by heat stress. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *12*, Article 11. <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00523-5>
- Gutiérrez-del-Río, I., López-Ibáñez, S., Magadán-Corpas, P., Fernández-Calleja, L., Pérez-Valero, Á., Tuñón-Granda, M., Miguélez, E. M., Villar, C. J., & Lombó, F. (2020). Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation. *Antioxidants*, *10*(8), Article 1264. <https://doi.org/10.3390/antiox10081264>
- Habashy, W., Milfort, M., Fuller, A., Attia, Y., Rekaya, R., & Aggrey, S. (2022). Effect of heat stress on protein digestibility and metabolism of meat-type chickens. *Livestock Science*, *261*, Article 104947. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104947>
- He, S., Arowolo, M., Medrano, R., Li, S., Yu, Q., Chen, J., & He, J. (2018). Impact of heat stress and nutritional interventions on poultry production. *World's Poultry Science Journal*, *74*(4), 647-664. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000727>
- Kikusato, M., & Toyomizu, M. (2019). Mechanisms underlying the effect of heat stress on muscle growth and mitochondria. *Journal of Poultry Science*, *56*(1), 1-6. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180003>
- Liu, B., Xiong, Y., Jiang, J., Yu, D., & Lin, G. (2021). Cellular antioxidant mechanism of selenium-enriched yeast diets in the protection of

- meat quality of heat-stressed hens. *Food Bioscience*, 39, Article 100798. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100798>
- Mangan, E. M., & Siwek, M. (2023). Unraveling the genetics of heat stress in poultry through functional genomics and genome-wide association studies. *Frontiers in Genetics*, 14, Article 1064585. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1064585>
- Moustafa, E. S., Alsanie, W. F., Gaber, A., Kamel, N. N., Alaqil, A. A., & Abbas, A. O. (2021). Blue-green algae (*Spirulina platensis*) alleviates the negative impact of heat stress on broiler production performance and redox status. *Animals*, 11(5), Article 1243. <https://doi.org/10.3390/ani11051243>
- Onagbesan, O. M., Uyanga, V. A., Oso, O. A., Tona, K., & Oke, O. E. (2023). Alleviating heat stress effects in poultry: Updates on methods and mechanisms of actions. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, Article 1255520. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1255520>
- Rostagno, M. (2020). Effects of heat stress on the gut health of poultry. *Journal of Animal Science*, 98(4), Article skaa090. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa090>
- Roushdy, E., Zagloul, A., El-Tarabany, M., & Abuoghaba, A. (2018). Effects of chronic heat stress on hormonal responses, survivability and growth performance of three commercial crossbred lines of chickens. *Journal of Thermal Biology*, 74, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.03.013>
- Saeed, M., Abbas, G., Alagawany, M., Kamboh, A., El-Hack, M., Khafaga, A., & Chao, S. (2019). Heat stress management in poultry farms: A comprehensive overview. *Journal of Thermal Biology*, 84, 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.07.025>
- Surai, P. F., Kochish, I. L., Fisinin, V. I., & Kidd, M. T. (2019). Antioxidant defence systems and oxidative stress in poultry biology: An update. *Antioxidants*, 8(7), Article 235. <https://doi.org/10.3390/antiox8070235>
- Surai, P. F., Earova, S. A., & Sparks, N. H. C. (2022). Gut microbiota of poultry: More than 1000 published papers - What have we learned? *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 107(1), 78-95. <https://doi.org/10.1111/jpn.13764>
- Tang, X., Liu, X., & He, J. (2021). Effects of different heating methods on lipid oxidation and structure changes of walnuts. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9), Article e15734. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15734>
- Teyssier, J., Brugaletta, G., Sirri, F., Dridi, S., & Rochell, S. (2022). A review of heat stress in chickens. Part II: Insights into protein and energy utilization and feeding. *Frontiers in Physiology*, 13, Article 943612. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.943612>
- Torres-Rodríguez, A., Donoghue, A. M., Donoghue, D. J., Rávago-Martínez, L., Carey, J. B., & Hargis, B. M. (2019). Performance and condemnation rate analysis of commercial turkey flocks treated with a *Lactobacillus* spp.-based probiotic. *Poultry Science*, 86(3), 444-448. <https://doi.org/10.1093/ps/86.3.444>
- Uyanga, V. A., Oke, E. O., Amevor, F. K., Zhao, J., Wang, X., Jiao, H., Onagbesan, O. M., & Lin, H. (2022). Functional roles of taurine, L-theanine, L-citrulline, and betaine during heat stress in poultry. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13, Article 60. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00675-6>
- Vandana, G., Sejian, V., Lees, A., Pragna, P., Silpa, M., & Maloney, S. (2020). Heat stress and poultry production: Impact and amelioration. *International Journal of Biometeorology*, 65, 163-179. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02023-7>
- Wasti, S., Sah, N., & Mishra, B. (2020). Impact of heat stress on poultry health and performances, and potential mitigation strategies. *Animals*, 10(8), Article 1266. <https://doi.org/10.3390/ani10081266>
- Wasti, S., Sah, N., Singh, A., Lee, C., Jha, R., & Mishra, B. (2021). Dietary supplementation of dried plum: A novel strategy to mitigate heat stress in broiler chickens. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12, Article 79. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00571-5>
- Wu, G. (2020). Important roles of dietary taurine, creatine, carnosine, anserine and 4-hydroxyproline in human nutrition and health. *Amino Acids*, 52(3), 329-360. <https://doi.org/10.1007/s00726-020-02823-6>
- Xia, J., Qi, X., Wu, Y., Zhu, B., Xu, L., Zhang, L., Gao, X., Chen, Y., Liu, J. F., & Ma, Y. (2022). Genome-wide association study identifies loci and candidate genes for non-specific inflammation in Chinese Simmental beef cattle. *Journal of Applied Genetics*, 63, 249-259. <https://doi.org/10.1007/s13353-021-00660-x>
- Yang, R., Li, X., Zhang, H., & Wu, J. (2023). Effects of dietary protein-energy ratio on growth performance and nutrient utilization in broiler chickens under heat stress. *Czech Journal of Animal Science*, 68(4), 185-193. <https://doi.org/10.12418/CJAN2023.563>