



**Somos calidad,
somos USC**

**Suplementación mineral como estrategia para mitigar la diseminación de *E. coli*
O157:H7 en la cadena productiva bovina**

**Autor
Natalia Gómez Vargas**

**Título por el que opta
Médico Veterinario**

**Director
Carlos Emilio Cabrera Matajira
Camilo Ernesto Guarín Patarroyo**

**Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Medicina Veterinaria
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Científico	Esta revisión sistemática consolida la evidencia sobre la eficacia de la suplementación mineral en la reducción de <i>E. coli</i> O157:H7 en bovinos, destacando su potencial como herramienta preventiva en la seguridad alimentaria. Identifica minerales clave, mecanismos de acción y vacíos en la investigación, orientando futuras estrategias sanitarias en la producción ganadera.	Productores, investigadores, autoridades sanitarias y consumidores, al mejorar la inocuidad de la carne y reducir riesgos zoonóticos en la cadena alimentaria.

Suplementación mineral como estrategia para mitigar la diseminación de *E. coli* O157:H7 en la cadena productiva bovina.

Natalia Gómez Vargas¹, Carlos Emilio Cabrera Matajira², Camilo Ernesto Guarín Patarroyo¹.

¹Estudiante de Medicina Veterinaria, Universidad Santiago de Cali, Natalia.gomez05@usc.edu.co. ²Médico Veterinario y zootecnista, MsC, Universidad Santiago de Cali, Carlos.cabrera@alumni.uso.br. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

En esta revisión sistemática se evaluó la suplementación mineral como estrategia para mitigar la diseminación de *Escherichia coli* O157:H7 en la cadena productiva bovina. Se recuperaron 168 artículos científicos en cinco bases de datos; tras aplicar los criterios de elegibilidad y exclusión, se seleccionaron 21 artículos, de los cuales 11 se incluyeron en la discusión y el resto enriquecieron apartados metodológicos e introductorios. Los estudios revisados emplearon principalmente zinc en diferentes presentaciones (metionina, proteinato, óxido) y, en menor medida, cobre, reportando efectos positivos en la salud y productividad bovina. Entre los beneficios observados destacaron la reducción en la incidencia y duración de la diarrea, el incremento de la ganancia diaria de peso, la mejora en la eficiencia alimenticia y el fortalecimiento de la función inmune y la integridad de la barrera intestinal. Asimismo, la suplementación con zinc moduló la microbiota intestinal, favoreciendo poblaciones bacterianas beneficiosas y reduciendo condiciones propicias para la colonización de *E. coli* O157:H7. Sin embargo, algunos estudios evidenciaron riesgos como la co-selección de resistencia antimicrobiana en bacterias comensales. En conjunto, la evidencia sugiere que la suplementación mineral, especialmente con zinc de alta biodisponibilidad, es prometedora para estrategias preventivas, pero requiere más estudios con mediciones directas de *E. coli* O157:H7, estandarización metodológica y evaluación de riesgos asociados.

Palabras claves: *Aditivos, resistencia antimicrobiana, E. coli O157:H7, salud pública.*

Mineral Supplementation as a Strategy to Mitigate the Dissemination of *E. coli* O157:H7 in the Bovine Production Chain

ABSTRACT

This systematic review evaluated mineral supplementation as a strategy to mitigate the spread of *Escherichia coli* O157:H7 in the cattle production chain. A total of 168 records were retrieved from five databases; after applying eligibility and exclusion criteria, 21 articles were selected, 11 of which were included in the discussion panel and the rest were used to enrich the methodological and introductory sections. The reviewed studies primarily used zinc in different forms (methionine, proteinate, oxide) and, to a lesser extent, copper, reporting positive effects on cattle health and productivity. Among the observed benefits were a reduction in the incidence and duration of diarrhea, increased daily weight gain, improved feed efficiency, and a strengthening of immune function and intestinal barrier integrity. Furthermore, zinc supplementation modulated the intestinal microbiota, promoting beneficial bacterial populations and reducing conditions conducive to *E. coli* O157:H7 colonization. However, some studies have shown risks such as co-selection of antimicrobial resistance in commensal bacteria. Overall, the evidence suggests that mineral supplementation, especially with highly bioavailable zinc, is promising for preventive strategies, but requires further studies with direct measurements of *E. coli* O157:H7, methodological standardization, and assessment of associated risks.

Keywords: *Additives, antimicrobial resistance, E. coli O157:H7, public health.*

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria es una preocupación creciente a nivel mundial, debido a su estrecha relación con la salud pública y la necesidad de garantizar alimentos inocuos para el consumo humano (Roth & Galyon, 2024). Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), las enfermedades transmitidas por alimentos afectan a cerca de 600 millones de personas cada año y provocan aproximadamente 420.000 muertes, siendo *Escherichia coli* uno de los patógenos más frecuentemente implicados (Hunduma et al., 2024). Entre los principales desafíos en este ámbito, *E. coli* O157:H7, una cepa patógena capaz de causar enfermedades gastrointestinales graves y complicaciones severas como el síndrome urémico hemolítico, con alta morbilidad e incluso mortalidad en poblaciones vulnerables (Dos Santos et al., 2023).

Esta problemática adquiere una relevancia particular en la industria, dado que los bovinos actúan como reservorios asintomáticos de *E. coli* O157:H7, facilitando su diseminación a lo largo de toda la cadena de producción (Rivas-Ruiz et al., 2020). Al no presentar signos clínicos, estos animales funcionan como "huéspedes silenciosos", lo que dificulta la detección temprana del patógeno y aumenta el riesgo de contaminación en los diferentes productos. Estudios recientes han detectado la presencia de *E. coli* O157:H7 en canales bovinas y estructuras implicadas tras el sacrificio (Tarekegn et al., 2023), lo que subraya la importancia de establecer medidas preventivas eficaces desde las etapas iniciales del proceso productivo para reducir los riesgos a la salud pública.

La contaminación de la carne con *E. coli* O157:H7 ocurre principalmente durante el faenado, cuando el contacto con materia fecal o superficies inadecuadamente higienizadas facilita la transferencia del patógeno desde el tracto gastrointestinal del bovino a la canal (Dos Santos et al., 2023). Errores en procesos como el eviscerado, escaldado o la desinfección de equipos aumentan este riesgo (Bonardi et al., 2015). Posteriormente, fallas en la cadena de frío, en la cocción y la manipulación cruzada en el hogar o restaurantes permiten que la bacteria alcance al consumidor (Dos Santos et al., 2023). Estas deficiencias a lo largo de la cadena productiva convierten al bovino en un reservorio silencioso capaz de generar un impacto significativo en la salud pública.

En este contexto, la intervención nutricional mediante suplementación mineral se ha propuesto como una estrategia prometedora para mitigar la colonización intestinal y reducir la excreción fecal de *E. coli* O157:H7. Entre los minerales evaluados, el zinc ha mostrado efectos positivos sobre la integridad del epitelio intestinal. Un estudio demostró que la suplementación con este mineral puede fortalecer las uniones estrechas de las células intestinales, generando una barrera menos permeable a los patógenos, incluyendo enterobacterias multirresistentes como *E. coli* (Lee et al., 2024).

El cobre también ha sido estudiado por su efecto antimicrobiano, ya que afecta a varios objetivos celulares o virales, causando desestabilización de la membrana y la cápside, producción de ROS, daño a las proteínas, inhibición enzimática, desplazamiento de los centros Fe-S y genotoxicidad (Ramos-Zúñiga et al., 2023). Por ejemplo, se ha documentado que su suplementación en vacas preñadas puede reducir la incidencia de mastitis causada por *E. coli*, aunque se debe tener precaución con su uso debido a riesgos como toxicidad o la posible inducción de resistencia bacteriana (Scaletti et al., 2003). De forma similar, el selenio ha demostrado propiedades inmunomoduladoras; se ha reportado que la selenometionina, una forma orgánica de este mineral puede mitigar la inflamación mediada por NF- κ B en células epiteliales mamarias bovinas inducida por *E. coli*, lo que sugiere su potencial aplicación para el control del patógeno en otros sistemas orgánicos (Tao et al., 2022).

No obstante, persisten vacíos de conocimiento importantes. Muchos estudios se han centrado en la reducción de la excreción fecal del patógeno, sin considerar su evolución a lo largo de la cadena productiva hasta la carne destinada al consumo humano. Tampoco existe consenso sobre las dosis, formas químicas y combinaciones más efectivas de estos minerales. Por ello, resulta necesario consolidar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre el uso de la suplementación con minerales en bovinos, para evaluar su impacto en la mitigación de *E. coli* O157:H7 tanto a nivel intestinal como en la inocuidad de la carne final. Esta revisión busca responder a esta necesidad, aportando elementos para optimizar estrategias de control en la producción primaria y reducir riesgos en salud pública.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta revisión sistemática mixta, de carácter narrativo se desarrolló utilizando las directrices de presentación de informes Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page et al., 2021). Para la pregunta de investigación se siguió la metodología de acrónimo PICO (Población, Intervención, Comparación, Resultado) (Chocobar Reyes & Barreda Medina, 2025), donde la población corresponde a bovinos en sistemas de producción; la intervención, a la suplementación mineral; el comparador, a bovinos sin suplementación mineral o con otro tipo de intervención; y el resultado, a la disminución de la diseminación, carga o prevalencia de *E. coli* O157:H7. La definición de estos elementos se basó en información proveniente de estudios científicos recientes, con el propósito de enfocar el análisis en evidencia publicada. En este sentido, La pregunta final fue: *¿Existen datos científicos recientemente publicados que muestren que, en bovinos de producción, la suplementación mineral comparada con la no suplementación o con otras estrategias reduce la diseminación de E. coli O157:H7 en la cadena productiva?*

A partir de esto, la fase inicial consistió en realizar una búsqueda a partir de términos generales relacionados con el tema de interés: *Suplementación mineral y diseminación de E. coli O157:H7 en bovinos*. Para Ello, se emplearon las palabras clave en inglés y español combinadas con los operadores booleanos AND, OR y NOT. dando como resultado la estrategia de búsqueda a aplicar ("*Escherichia coli* O157:H7" OR "*E. coli* O157:H7") AND ("mineral supplementation" OR "trace minerals" OR "mineral additives" OR "dietary minerals") AND ("cattle" OR "bovine" OR "beef cattle" OR "dairy cattle") AND ("prevalence" OR "shedding" OR "transmission" OR "colonization") AND ("feedlot" OR "production chain" OR "meat production" OR "slaughterhouse").

La búsqueda inicial arrojó (n de artículos) artículos. El idioma utilizado para la búsqueda fue el inglés. Solo se incluyeron artículos publicados en revistas científicas con calificación Qualis A1 a B2 (según la clasificación de la CAPES) o SCIMago Q1 y Q2. Las búsquedas se realizaron entre noviembre del semestre académico 2024B y abril de 2025A en las bases de datos: PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), Scopus (<https://www.scopus.com/>) y Web of Science (<https://www.webofscience.com/>). De los artículos seleccionados mediante el protocolo de búsqueda, se registraron el título, el año, la revista, la calidad de la revista y la base de datos.

Los criterios de exclusión fueron: (i) artículos duplicados (el mismo artículo recuperado en diferentes bases de datos); (ii) título (artículos que no tenían a los bovinos como población objetivo, que no mencionaban *Escherichia coli* O157:H7, o que no abordaban la suplementación mineral como intervención); (iii) resumen (artículos que no evaluaban la diseminación, excreción o colonización de *E. coli* O157:H7 como desenlace, que no contenían datos primarios como revisiones, cartas al editor o editoriales, o que evaluaban otras estrategias no relacionadas con la suplementación mineral); y (iv) metodología (ausencia de grupo control, falta de descripción del tipo de suplemento mineral utilizado, carencia de datos microbiológicos cuantificables o falta de información sobre la población bovina estudiada).

Los artículos seleccionados para esta revisión sistemática fueron considerados adecuados para la extracción de datos cuando cumplían con criterios metodológicos que aseguraran la relevancia y calidad de la información. En particular, se incluyeron aquellos estudios que abordaban la suplementación mineral como estrategia de intervención, que describían con claridad los minerales utilizados, las dosis administradas, la vía de suplementación, la duración del tratamiento y los grupos experimentales incluidos (con o sin control). Además, se exigía que los artículos reportaran la presencia y/o concentración de *E. coli* O157:H7 en alguno de los eslabones de la cadena productiva bovina (animal, ambiente, carne o productos derivados), así como el tamaño de muestra (n), el tipo de diseño experimental, la región geográfica de ejecución del estudio y los métodos empleados para la

detección microbiológica. Se valoró también la inclusión de parámetros adicionales relacionados con la salud animal, la calidad del producto y la reducción del riesgo de contaminación cruzada.

Para evaluar la validez de los estudios incluidos, se aplicó una herramienta de análisis del riesgo de sesgo basada en los lineamientos de Cochrane (Higgins et al., 2016), que contempla cinco dominios fundamentales. En primer lugar, se consideró la asignación de muestras, clasificándose como de bajo riesgo si se empleó una asignación aleatoria o el uso de generadores de números aleatorios, y como de alto riesgo si la selección fue manual o no aleatoria. En segundo lugar, se evaluó el enmascaramiento o cegamiento del estudio, donde se consideró bajo riesgo si se aplicó un diseño doble ciego (investigadores y evaluadores sin conocimiento del grupo asignado) y alto riesgo si no se aplicó ningún tipo de cegamiento. El tercer dominio fue la completitud de los resultados, considerándose bajo riesgo cuando no se reportaron pérdidas de muestras o estas fueron justificadas adecuadamente, y alto riesgo si se evidenciaron pérdidas significativas sin explicación. En cuarto lugar, se valoró el tamaño muestral, estimándose como bajo riesgo cuando la cantidad de unidades experimentales fue adecuada y sustentada estadísticamente, y alto riesgo si se trató de muestras reducidas sin justificación. Finalmente, se tuvo en cuenta la calidad de la fuente de publicación, estableciéndose como bajo riesgo los artículos publicados en revistas indexadas en los cuartiles Q1 o Q2, y como alto riesgo aquellos en revistas de menor impacto o no indexadas.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de la evidencia científica

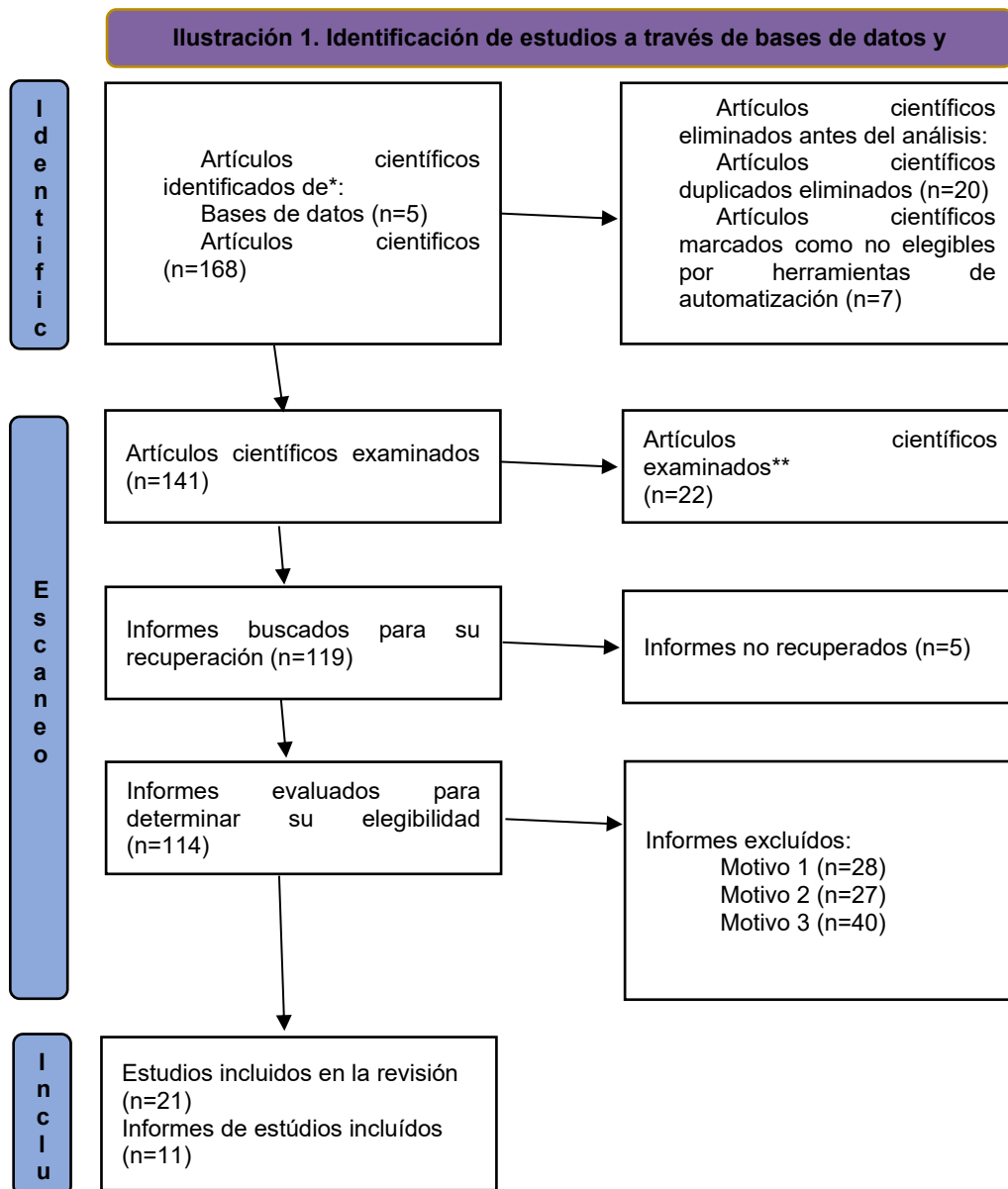
Se recuperaron 168 artículos científicos a través de la búsqueda en cinco bases de datos. Tras la eliminación de duplicados y de artículos científicos marcados como no elegibles por herramientas de automatización, se examinaron 146 artículos científicos mediante la revisión de títulos y resúmenes (Figura 1), de los cuales dos fueron excluidos por no cumplir con los criterios de inclusión. Posteriormente, se evaluaron 141 textos completos para determinar su elegibilidad, resultando excluidos 22 por no ajustarse a los criterios establecidos, cinco por falta de acceso al texto completo y 73 porque la intervención o exposición evaluada, el tamaño de muestra, el diseño experimental, la región geográfica o los métodos empleados para la detección microbiológica no cumplían con los requisitos definidos para esta revisión. Finalmente y tras la aplicación de los criterios de exclusión, se seleccionaron 21 artículos (Figura 1), a los cuales se les aplicó un formulario de extracción que recopiló información sobre el tipo de suplemento mineral utilizado, la dosis y vía de administración, la duración del tratamiento, el método de detección y cuantificación de *Escherichia coli* O157:H7, el tipo de muestra analizada (materia fecal, contenido ruminal, superficie corporal, ambiente, entre otros), el resultado principal (carga bacteriana, prevalencia, frecuencia de excreción, etc.), el diseño experimental, la región geográfica y el tipo de sistema productivo, así como la raza, edad y número de animales incluidos, para la discusión se revisaron 11 artículos, el restante enriquecieron apartados como metodología e introducción.

La aplicación de la herramienta Cochrane para el análisis del riesgo de sesgo evidenció diferencias notables en la calidad metodológica de los estudios incluidos. En el dominio de asignación de muestras, la mayoría de los ensayos en bovinos reportaron algún tipo de aleatorización, ya sea por bloques o mediante generadores de números aleatorios, lo que permitió clasificarlos como de bajo riesgo. Sin embargo, algunos estudios *in vitro* o con grupos reducidos no especificaron el método de asignación, lo que incrementa la incertidumbre.

En cuanto al enmascaramiento, los estudios con diseños doble ciego como el de (Feldmann et al., 2019; Wo et al., 2022) fueron clasificados como de bajo riesgo, mientras que otros no reportaron ningún tipo de cegamiento, lo que puede introducir sesgo en la evaluación de resultados, especialmente en variables clínicas como la diarrea. En el dominio de completitud de resultados, la mayoría de las investigaciones reportaron todas las mediciones planificadas o justificaron adecuadamente las pérdidas de animales, aunque algunos estudios *in vitro* no contemplaron esta categoría por su naturaleza experimental.

Respecto al tamaño muestral, los ensayos con más de 100 animales fueron considerados de bajo riesgo, al sustentar su cálculo estadístico y contar con potencia suficiente para detectar diferencias significativas. En

contraste, estudios con menos de 10 animales por grupo y sin justificación estadística fueron clasificados como de alto riesgo en este dominio. Finalmente, la calidad de la fuente de publicación fue, en general, alta, ya que la mayoría de los artículos se publicaron en revistas indexadas en cuartiles Q1 y Q2, lo que respalda la solidez de la evidencia reportada.



4. *E. coli* O157:H7 en la cadena productiva bovina

a. Características de la bacteria y factores de virulencia

Los artículos incluidos en esta monografía describen la bacteria *Escherichia coli* O157:H7 como una enterobacteria productora de toxinas Shiga; las cuales son responsables de los cuadros clínicos en los bovinos que incluyen colitis hemorrágica y en los humanos; síndrome urémico hemolítico (Tarekegn et al., 2023). Esta bacteria tiene la

capacidad de sobrevivir en el tracto gastrointestinal los bovinos sin causar síntomas aparentes, actuando como reservorios, además este patógeno cuenta con un factor de virulencia el cual aumenta el daño en el animal, en donde este es capaz de adherirse al epitelio intestinal gracias al locus del enterocito efaciante, que incluye genes como la intimina o también denominado *cae* y proteínas secretadas tipo III. También es importante tener en cuenta que esta bacteria es frecuentemente aislada de las canales bovinas, superficies involucradas en el proceso de faenado y en la materia fecal del animal (Dos Santos et al., 2023).

b. Rutas de transmisión y puntos críticos en la cadena productiva.

La principal ruta de transmisión es la contaminación fecal – canal que ocurre durante el faenado, así como también se produce su transmisión a la hora de realizar la evisceración, desuello, manipulación de equipos y falta de higiene por parte de los trabajadores (Dos Santos et al., 2023).

c. Impacto en salud humana, comercio y seguridad alimentaria.

La *E. coli* O157:H posee un gran impacto no solo en la salud animal si no también en la humana, pues es la responsable de causar brotes alimentarios, colitis hemorrágica y el síndrome urémico hemolítico (OMS, 2015). Estas afecciones no solo afectan el comercio nacional de la carne de res si no también el comercio internacional de la misma, debido a las medidas estrictas sobre la inocuidad alimentaria. Por otro lado, la contaminación de canales y de los productos derivados hacen que la confianza del consumidor final disminuya lo que conlleva a grandes pérdidas económicas (Hunduma et al., 2024).

5. Rol de los microminerales en la inmunidad y microbiota bovina

La evidencia científica reunida demuestra que los microminerales tienen funciones esenciales en la inmunidad, en el equilibrio y la regulación de la microbiota intestinal del bovino actuando como estabilizadores de membrana, cofactores enzimáticos, reguladores del ambiente gastrointestinal y moduladores del estrés oxidativo (Liu et al., 2023; Ma et al., 2020)

a. Función inmunomoduladora y antimicrobiana de los microminerales.

Los microminerales estudiados muestran efectos significativos en la respuesta inmunitaria. El zinc es el mineral con más evidencia, estimulando tanto la inmunidad innata como la adaptativa en terneros. La suplementación con zinc proteínato o zinc metionina aumenta las concentraciones de inmunoglobulinas IgG e IgM, mejorando la respuesta inmunitaria en las etapas tempranas de vida y ayudando a prevenir infecciones. Además, los animales suplementados tienen mayor capacidad antioxidante y menor producción de especies reactivas de oxígeno, lo que reduce marcadores de estrés oxidativo y mantiene un ambiente inmunológico estable (Liu et al., 2023; Wo et al., 2022).

En el área celular, las investigaciones mostraron cómo los microminerales afectan directamente las rutas de señalización que participan en procesos inflamatorios como lo es la selenometionina la cual disminuyó la activación del factor de transcripción NF-κB, lo que a su vez redujo la producción de citoquinas proinflamatorias y la adherencia de bacterias en células epiteliales de bovino, demostrando un fuerte impacto en la modulación del sistema inmunológico que podría detener infecciones provocadas por bacterias Gram negativas como la *E. coli* (Tao et al., 2022).

Respecto a la actividad antimicrobiana, los estudios indican que tanto el zinc como el cobre tienen propiedades tanto bacteriostáticas como bactericidas. Se ha comprobado que el zinc puede interferir con el crecimiento de bacterias y, en algunas ocasiones, disminuir la resistencia a los antimicrobianos en bacterias comensales del intestino, al reducir la concentración mínima inhibitoria (MIC) necesaria para ciertos antibióticos en cepas de *E. coli* (Lee et al., 2024).

En el caso del cobre, se reveló que este micromineral posee efectos antimicrobianos directos a través de mecanismos que causan daño a la membrana de las bacterias, inestabilidad de proteínas, alteraciones en sistemas de hierro y azufre, generación de especies reactivas de oxígeno y daño a ADN. Algunos estudios

realizados en laboratorio y en modelos porcinos, se denoto que la adición de cobre disminuyó el crecimiento de enterobacterias patógenas y mostró su potencial como controlador previo a la cosecha; no obstante, su aplicación debe analizarse con precaución debido al posible impacto en poblaciones bacterianas beneficiosas (Fernández et al., 2024).

6. Microminerales con efecto contra *E. coli* O157:H7

Los microminerales analizados en la presente monografía demuestran impactos importantes en la salud del intestino, la defensa inmune y la regulación de la microbiota, creando escenarios menos propicios para la colonización y permanencia de *Escherichia coli* O157:H7 en vacas. A pesar de que son escasas las investigaciones que cuantificaron directamente la carga del patógeno, los procesos biológicos detectados sugieren una influencia indirecta, pero considerable, sobre su comportamiento en el huésped.

6.1. Zinc (Zn)

a. Impacto en la integridad intestinal.

El zinc, especialmente en sus variantes orgánicas como zinc metionina y zinc proteinato, mejora notablemente la composición del epitelio del intestino. Las investigaciones presentadas mostraron aumentos considerables en la altura de las vellosidades, disminución en la profundidad de las criptas y una mayor relación entre vellosidades y criptas, lo que indica una barrera intestinal más efectiva. Además, se notó un incremento en la expresión de proteínas de uniones estrechas (occludin, claudin, ZO-1), que son cruciales para disminuir la permeabilidad intestinal y prevenir la translocación de bacterias (Ma et al., 2020; Chang et al., 2020). Estas mejoras limitan la colonización por patógenos intestinales al restringir los microambientes que favorecen su adhesión y multiplicación.

b. Actividad bacteriostática y efecto en la microbiota.

La información revelada en los artículos indica que la adición de zinc afecta la microbiota del intestino, promoviendo géneros beneficiosos como *Lactobacillus* y *Faecalibacterium*. Esta alteración crea ambientes fermentativos estables que pueden competir con bacterias dañinas por nutrientes y espacio. (Chang et al., 2020) Asimismo, se encontró que el zinc puede influir en la resistencia a los antimicrobianos en las bacterias fecales, reduciendo la concentración mínima inhibitoria de antibióticos importantes frente a *E. coli*, lo que podría facilitar su manejo (Lee et al., 2024)

c. Estudios en bovinos o modelos similares.

Se evidencio que en los becerros antes del destete, el aporte de zinc metionina y proteinato de zinc disminuyó de manera importante la aparición y el tiempo que duró la diarrea, optimizó la función inmune y reforzó la salud del intestino; aspectos que, de forma indirecta, limitan la expansión y propagación de enterobacterias como *E. coli* O157:H7 (Feldmann et al., 2019; Liu et al., 2023; Wo et al., 2022).

6.2. Cobre (Cu)

a. Proceso del daño bacteriano.

El cobre actúa directamente contra bacterias Gram negativas y Gram positivas, eliminándolas a través de diversas vías tales como; dañar la estructura de la membrana bacteriana, generar moléculas reactivas de oxígeno (ERO), provocar alteraciones en las proteínas y el ADN, interferir con centros de hierro-azufre cruciales para la función respiratoria microbiana (Fernández et al., 2024; Ramos-Zúñiga et al., 2023).

b. Precauciones por toxicidad.

En rumiantes, el cobre presenta un margen estrecho de seguridad, dar demasiado suplemento puede dañar el hígado y cambiar la flora microbiana, elevando las Enterobacteriaceae en algunos animales. (Fernández et al.,

2024) Así pues, su uso debe ser algo cuidadoso, sin emplear cantidades que pongan en riesgo la salud del animal o el equilibrio microbiano.

6.3. Selenio (Se)

a. Rol en el sistema antioxidante y la respuesta inmune.

El selenio es un componente de las enzimas antioxidantes, como la glutatión peroxidasa, que ayudan a reducir el estrés oxidativo y a proteger los tejidos de los animales contra la inflamación. Se demostró que, en las células epiteliales de los bovinos, la selenometionina atenuó la activación de NF- κ B, disminuyó la síntesis de citoquinas proinflamatorias y frenó la adhesión de *E. coli* (Tao et al., 2022).

7. Formas de suplementación mineral

a. Minerales inorgánicos vs. orgánicos (quelatados).

Las investigaciones revisadas revelan que los minerales orgánicos, aquellos que se enlazan a aminoácidos como la metionina o el proteinato, tienen una biodisponibilidad superior y generan efectos fisiológicos más predecibles en comparación con las versiones inorgánicas, como óxidos o sulfatos (Ma et al., 2020; Liu et al., 2023). Se observó que el zinc metionina y el zinc proteinato mejoraban notablemente: la salud del intestino, el sistema inmunitario, la disminución de la diarrea y la regulación de la microbiota.

b. Aprovechamiento y absorción a nivel orgánico.

Las presentaciones orgánicas se caracterizan por una optimizada asimilación intestinal, una reducida interacción negativa con otros minerales, una eficiencia superior usando cantidades inferiores, unos efectos extendidos sobre los parámetros productivos e inmunitarios (Wo et al., 2022)

c. Diseño de dietas y estrategias de suplementación práctica en bovinos.

Según investigaciones recientes (Liu et al., 2023), una ingesta de aproximadamente 80 mg diarios de zinc que el cuerpo pueda utilizar de forma eficiente resulta ser lo más adecuado para optimizar la salud del intestino y para reducir aquellos elementos que favorecen el asentamiento de microorganismos dañinos.

Con el fin de describir con mayor precisión las características y hallazgos de cada uno de los estudios incluidos en esta revisión sistemática, en la Tabla 1 se presenta la información extraída de manera detallada. En ella se documentan aspectos clave como suplementación mineral como estrategia de intervención, minerales utilizados, dosis administradas, la vía de suplementación, la duración del tratamiento y los grupos experimentales incluidos (con o sin control); la presencia y/o concentración de *E. coli* O157:H7 en alguno de los eslabones de la cadena productiva bovina, así como el tamaño de muestra (n), el tipo de diseño experimental, la región geográfica de ejecución del estudio y los métodos empleados para la detección microbiológica.

Tabla 1. Información detallada de los estudios incluidos en la revisión sistemática sobre Minerales usados como suplemento en alimentación bovina

Autor	Población	Mineral(es)	Dosis y vía de administración	Duración del tratamiento	Grupos experimentales		Tipo de muestra	Método de detección	Resultados principales	Parámetros adicionales	Región geográfica	Conclusiones
(Lee et al., 2024)	67 terneros lecheros pre-destete (39 placebo, 28 ZnSO ₄)	Zinc (sulfato)	Oral, durante tratamiento clínico	14 días (cumulativos)	Tratado placebo	vs.	Materia fecal	AST para <i>Enterococcus</i> spp. y <i>E. coli</i>	Reducción significativa en MIC de ciprofloxacino y ácido nalidíxico en <i>E. coli</i> ; sin cambios en <i>Enterococcus</i> spp.	Relación con edad y exposición antimicrobianos	EE. UU.	ZnSO ₄ puede reducir resistencia a ciertos antibióticos en <i>E. coli</i> .
(Tao et al., 2022)	Células epiteliales mamarias bovinas (MAC-T)	Selenio (Selenometionina)	Cultivo celular (pre y post-infección)	N/A (in vitro)	Tratado	vs. no	Células infectadas con <i>E. coli</i>	RT-qPCR, Western blot, IF	Se-Met aumentó LC3-II, redujo fosforilación p65/IκBα, menor adhesión bacteriana y citocinas proinflamatorias	Regulación NF-κB vía autofagia	China	Se-Met atenúa inflamación inducida por <i>E. coli</i> mediada por autofagia.
(Feldmann et al., 2019)	1.482 terneros Holstein pre-destete	Zinc (metionina, sulfato)	En leche, 1 vez/día	14 días	Placebo, ZnSO ₄	Zn-Met,	Materia fecal	ELISA fecal (<i>E. coli</i> K99, rotavirus, coronavirus, <i>C. parvum</i>)	ZM y ZS redujeron riesgo y duración de diarrea; ZM aumentó ADG en machos	Peso al nacer, ganancia diaria, sexo	EE. UU.	Zn reduce diarrea y mejora peso en subgrupos.
(Ma et al., 2020)	24 terneros Holstein machos	Zinc (metionina, óxido)	Zn-Met 455 mg/d (~80 mg Zn), ZnO 103 mg/d (~80 mg Zn) en leche	14 días	Control, ZnO	Zn-Met,	Intestino delgado, sangre	Histología intestinal, RT-qPCR	Zn-Met redujo diarrea, mejoró GDP y eficiencia alimentaria, aumentó altura de vellosidades y expresión TJ, redujo D-lactato	Morfología intestinal, proteínas de unión estrecha	China	Zn-Met mejora barrera intestinal y reduce diarrea; ZnO sin efectos significativos.
(Liu et al., 2023)	24 terneros Holstein (2M, 6H/grupo)	Zinc (proteinato, óxido)	ZnPro 627 mg/d (~80 mg Zn), ZnO 101 mg/d (~80 mg Zn) en leche	28 días	Control, ZnO	ZnPro,	Materia fecal, sangre	Evaluación clínica, parámetros inmunes	ZnPro y ZnO redujeron diarrea y mejoraron IgG; ZnPro mejoró ADG, IgM y capacidad antioxidante más que ZnO	ALP, MT, MDA, citocinas	China	ZnPro más efectivo para crecimiento e inmunidad; ambos reducen diarrea.
(Chang et al., 2020)	30 terneros Holstein	Zinc (óxido, metionina)	ZnO 104 mg (~80 mg Zn), Zn-Met 457 mg (~80 mg Zn) en leche	14 días	Control, ZnO, Zn-Met		Materia fecal, microbiota rectal	Análisis microbiota fecal (NGS), parámetros inmunes	ZnO redujo diarrea primeros 3 días e incrementó IgG/IgM; Zn-Met redujo diarrea 14 días y mejoró crecimiento; cambios en abundancia bacteriana	Microbiota, inmunoglobulinas	China	ZnO útil primeros días; Zn-Met beneficios posterior; ambos reducen diarrea.
(Murray et al., 2021)	Ganado de engorde (n NR)	Zinc + mentol	Dieta suplementada	NR	Zinc, control	mentol,	Materia fecal	Cultivo en agar MacConkey y m- <i>Enterococcus</i> (con/sin antibióticos)	Mentol ↓ crecimiento en agar con tetraciclina; zinc ↑ crecimiento en agar con eritromicina; zinc ↑ resistencia a macrólidos en enterococos	Resistencia antimicrobiana	Canadá/EE. UU.	Zinc puede co-seleccionar resistencia a macrólidos; mentol reduce resistencia a tetraciclinas.

Autor	Población	Mineral(es)	Dosis y vía de administración	Duración del tratamiento	Grupos experimentales	Tipo de muestra	Método de detección	Resultados principales	Parámetros adicionales	Región geográfica	Conclusiones
(Wo et al., 2022)	40 terneras Holstein (Exp1), 36 terneras Holstein (Exp2)	Zinc proteinato (ZP), zinc metionina (ZM)	ZP 40-120 mg Zn/día; ZM 80 mg Zn/día; en leche	14 días (Exp1), 28 días (Exp2)	Control, ZP, ZM	Materia fecal, sangre	Parámetros clínicos e inmunológicos	ZP 80 mg/d ↑ ADG, ↑ IgG/IgM, ↓ diarrea, ↓ MDA, ↓ IL-1β; efectos comparables a ZM	Antioxidantes, citocinas	China	ZP 80 mg/d es dosis óptima; mejora crecimiento e inmunidad y reduce diarrea.
(Fernández et al., 2024)	48 cerdos de engorde	Cobre (en perlas de alginato)	Inclusión en dieta	NR	Tratado vs. control	Materia fecal	Cultivo bacteriano, secuenciación microbioma	↓ Salmonella in vitro; ↑ Enterobacteriaceae y ↓ LAB in vivo; cambios en composición microbiota	Microbiota, niveles fecales de cobre	Canadá	Perlas de cobre liberan Cu antimicrobiano y modifican microbiota; potencial como intervención pre-cosecha.
(Birnbaum et al., 2021)	Leche cruda bovina (in vitro)	Lactoferrina	14.05–112.5 mg/mL en leche	N/A	Varias concentraciones	Producto lácteo crudo	Ensayo MIC en leche	E. coli O157:H7 inhibido ≥14.05 mg/mL; S. enterica inhibido ≥112.5 mg/mL	Potencial biopreservante	EE. UU.	Lactoferrina podría prolongar vida útil y reducir patógenos en leche.

En conjunto, los estudios incluidos en la tabla evidencian que la suplementación mineral, especialmente con diferentes fuentes y presentaciones de zinc (zinc metionina, zinc proteinato, zinc óxido) y en algunos casos cobre, puede contribuir de manera significativa a mejorar parámetros productivos y sanitarios en bovinos y otros animales de interés pecuario. La mayoría de las intervenciones reportaron una reducción en la incidencia y duración de la diarrea en terneros lactantes, mejoras en la ganancia diaria de peso y en la eficiencia alimenticia, así como efectos positivos sobre la función inmune, el estatus antioxidante y la modulación de la microbiota intestinal. Algunos trabajos también resaltaron que la suplementación mineral puede influir en la resistencia antimicrobiana de bacterias comensales, evidenciando tanto beneficios potenciales (como disminución de crecimiento bacteriano con mentol o cambios favorables en la microbiota) como riesgos (co-selección de resistencia a macrólidos asociada al zinc). En especies distintas al bovino, como el cerdo, se observó que el cobre administrado mediante formulaciones específicas modificó de forma significativa la composición microbiana intestinal, mostrando potencial como intervención pre-cosecha para reducir patógenos, aunque con cambios en poblaciones beneficiosas que requieren evaluación adicional.

Aunque no fue incluido en la tabla por tratarse de una revisión y no de un ensayo experimental, el trabajo de (Cuajungco et al., 2021) proporciona un marco teórico amplio sobre los efectos multidimensionales del zinc en organismos procariotas y eucariotas. Este estudio destaca que el zinc, además de su papel estructural y catalítico en numerosos procesos celulares, posee propiedades antimicrobianas que pueden modular la proliferación bacteriana, influir en la expresión de proteínas clave y alterar la viabilidad celular. Asimismo, discute el potencial de los quelantes de zinc como moduladores de su actividad, tanto para potenciar su acción antimicrobiana como para controlar posibles efectos adversos en células huésped. Esta perspectiva es relevante para interpretar y optimizar las estrategias de suplementación mineral observadas en los estudios empíricos, orientando futuras aplicaciones en la cadena productiva bovina con un enfoque más seguro y eficaz.

8. DISCUSIÓN

El análisis de los estudios incluidos en esta revisión permitió identificar que la suplementación mineral, particularmente con zinc en sus diferentes formas (metionina, proteinato, óxido y sulfato), y en menor medida con cobre, constituye una estrategia con efectos potenciales sobre la salud intestinal, la función inmune y la modulación de la microbiota en bovinos (Lee et al., 2024). Estos efectos indirectos pueden tener implicaciones relevantes en la mitigación de la diseminación de *Escherichia coli* O157:H7 a lo largo de la cadena productiva de carne y leche. Aunque no todos los trabajos evaluaron de manera directa la presencia o carga de este patógeno, la mayoría reportó resultados relacionados con factores que condicionan su colonización y excreción, como la reducción de la diarrea neonatal, la mejora de la integridad intestinal, la modulación favorable de la microbiota, el incremento en la producción de inmunoglobulinas y la disminución de moléculas proinflamatorias.

En cuanto al efecto directo sobre *E. coli* O157:H7, la evidencia aún es limitada y heterogénea. (Biernbaum et al., 2021) demostraron que la lactoferrina inhibe in vitro el crecimiento del patógeno en leche cruda a concentraciones $\geq 14,05$ mg/ml, lo que sugiere posibles aplicaciones en la seguridad de productos lácteos. De manera indirecta, (Lee et al., 2024) observaron que la suplementación con sulfato de zinc redujo la resistencia antimicrobiana en cepas fecales de *E. coli*, lo que podría facilitar su control. Sin embargo, los estudios en animales vivos son escasos y presentan diferencias en diseño, tipo de mineral y metodología, lo cual limita la posibilidad de establecer conclusiones sólidas sobre la magnitud del efecto en la colonización y excreción fecal del patógeno.

Respecto a los efectos indirectos, la mayoría de los estudios coincidieron en que el zinc metionina y el zinc proteinato disminuyen la incidencia y duración de la diarrea neonatal y favorecen el crecimiento y la eficiencia alimentaria en terneros (Feldmann et al., 2019; Liu et al., 2023; Ma et al., 2020; Wo et al., 2022). Estos hallazgos son relevantes porque la diarrea temprana está estrechamente vinculada con alteraciones en la microbiota y con el aumento en la excreción de enterobacterias, incluido *E. coli* O157:H7. En contraste, el zinc óxido mostró efectos más limitados y menos sostenidos, probablemente debido a su menor biodisponibilidad y a un impacto reducido en el ecosistema intestinal (Chang et al., 2020; Ma et al., 2020).

La modulación de la microbiota intestinal emergió como un mecanismo clave. (Chang et al., 2020) y (Fernández et al., 2024) evidenciaron que la suplementación con zinc incrementa bacterias beneficiosas como *Faecalibacterium* y *Lactobacillus*, y modifica el balance entre Firmicutes y Proteobacteria, lo que podría disminuir la competitividad ecológica de *E. coli* O157:H7. Sin embargo, (Fernández et al., 2024) también reportaron que la inclusión de cobre aumentó Enterobacteriaceae y redujo bacterias ácido-lácticas, lo que sugiere que los efectos no siempre son favorables y que la composición microbiana puede variar en función del mineral, la dosis y la especie animal.

A nivel de inmunidad y función barrera, los minerales mostraron un papel importante en el fortalecimiento de las defensas del hospedador. El zinc metionina mejoró la morfología de las vellosidades intestinales y la expresión de proteínas de uniones estrechas, reduciendo la translocación bacteriana (Ma et al., 2020). Asimismo, el zinc proteinato incrementó las concentraciones séricas de IgG e IgM, estimuló la capacidad antioxidante y redujo marcadores inflamatorios como IL-1 β y MDA (Liu et al., 2023; Wo et al., 2022). Estos resultados apoyan la hipótesis de que la suplementación mineral no solo modula la microbiota, sino que también mejora la resistencia del epitelio intestinal a la colonización por enteropatógenos, contribuyendo de manera indirecta al control de *E. coli* O157:H7.

Pese a estos beneficios, no deben ignorarse los riesgos asociados. (Murray et al., 2021) reportaron que la suplementación con zinc en ganado de carne incrementó la resistencia a macrólidos en enterococos fecales, lo que implica un riesgo de co-selección de resistencia antimicrobiana con implicaciones en salud pública. Asimismo, (Fernández et al., 2024) señalaron que el cobre puede alterar desfavorablemente la microbiota, favoreciendo bacterias potencialmente patógenas. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de un enfoque prudente, en el que se maximicen los beneficios de la suplementación, pero se mantenga un monitoreo constante de la resistencia antimicrobiana y del equilibrio microbiano.

En este contexto, el zinc se perfila como un suplemento con aplicaciones no solo en salud y productividad animal, sino también en la prevención de riesgos para la salud pública asociados a *E. coli* O157:H7. Su capacidad para mejorar la integridad intestinal, modular la microbiota y fortalecer la inmunidad sugiere que puede reducir la excreción del patógeno y, por tanto, su entrada en la cadena alimentaria. No obstante, la falta de estudios que

midan directamente la presencia en animales y productos derivados limita la posibilidad de establecer relaciones causales concluyentes.

Por último, es importante tener en cuenta las limitaciones de la literatura revisada. Los estudios presentan una alta variabilidad metodológica, que abarca desde ensayos clínicos aleatorizados con tamaños muestrales robustos hasta investigaciones in vitro con escasas unidades experimentales. La mayoría se centró en terneros en etapa de predestete, por lo que hay lagunas de información sobre su efecto en bovinos adultos y en etapas posteriores de la cadena productiva. Además, persiste un bajo consenso acerca de las dosis óptimas, las formas químicas más eficaces y la duración de los tratamientos. Estas limitaciones subrayan la necesidad de realizar investigaciones más estandarizadas que permitan traducir las pruebas en recomendaciones aplicables en el terreno y que tengan un impacto verificable en la reducción de *E. coli* O157:H7.

8.1. CONCLUSIONES

La literatura científica analizada muestra que las dosis más efectivas de zinc para mejorar la salud intestinal y reducir factores asociados a la diseminación de *E. coli* O157:H7 en bovinos jóvenes se encuentran en el rango de 80 mg de zinc/día, suministrados en formas de alta biodisponibilidad como zinc metionina o zinc proteinato. Estas fuentes mostraron efectos más consistentes y sostenidos en comparación con el zinc óxido, especialmente en la reducción de diarrea neonatal, la mejora de la ganancia diaria de peso y el fortalecimiento de la integridad de la barrera intestinal.

La suplementación con zinc influye en la composición y diversidad de la microbiota intestinal, favoreciendo la proliferación de géneros bacterianos beneficiosos como *Lactobacillus* y *Faecalibacterium*, y modulando el equilibrio entre Firmicutes y Proteobacteria. Estos cambios podrían generar un ambiente intestinal menos favorable para la colonización y persistencia de *E. coli* O157:H7.

Si bien la suplementación mineral, especialmente con zinc, ofrece beneficios importantes, algunos estudios reportaron riesgos asociados a su uso. En particular, la suplementación con zinc puede co-seleccionar resistencia antimicrobiana en bacterias comensales como *Enterococcus spp.*, lo que plantea un desafío para su uso a largo plazo en sistemas intensivos.

También se identificó una amplia variabilidad en los diseños experimentales, las fuentes de minerales utilizadas y los parámetros evaluados, lo que dificulta establecer protocolos universales. Finalmente, existe una carencia de estudios que midan de forma directa el impacto de la suplementación mineral sobre la carga de *E. coli* O157:H7 en animales y productos derivados, lo que limita la extrapolación de los resultados a estrategias de control en la cadena productiva bovina.

En conjunto, la evidencia disponible sugiere que la suplementación mineral, particularmente con zinc en formas de alta biodisponibilidad, es una estrategia prometedora para mejorar la salud intestinal y reducir condiciones que favorecen la diseminación de *E. coli* O157:H7. Sin embargo, se requieren estudios adicionales con metodologías estandarizadas, mediciones directas del patógeno y evaluaciones a largo plazo para establecer protocolos seguros y efectivos que integren esta práctica en los programas de control de patógenos en la producción bovina.

9. AGRADECIMIENTOS

“Estén siempre alegres, oren sin cesar, den siempre gracias a Dios en toda su voluntad para ustedes en Cristo Jesús” (1 Tesalonicenses 5:16-18)

Doy gracias a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta que he anhelado durante tantos años.

Gracias a mis padres, seres tan maravillosos que me permitieron seguir este sueño, siendo pilares fundamentales en mi vida, apoyándome incondicionalmente, que estuvieron presentes desde el día 1 en donde empezó mi camino hasta lograr ser una profesional en Medicina Veterinaria. Gracias por enseñarme el valor del trabajo duro, la

perseverancia y el no rendirse ante cualquier obstáculo que se cruce en el camino. Este logro es tanto mío como suyo, el culminar la carrera sé que es uno de los más grandes orgullos que dé como hija les puede otorgar a ustedes, mis padres.

Sin duda alguna, gracias a mis compañeros peludos, estos que son fieles sin importar qué, quienes, sin saberlo, fueron la inspiración constante para seguir en esta hermosa profesión, porque cada que los veo, es como recordarme a mí misma, el por qué y para quién elegí esta vocación.

Gracias a mi universidad, por abrirme las puertas a la institución y brindarme todas las herramientas necesarias para formarme como una profesional digna, con maestros dispuestos a inculcarme y enseñarme sus conocimientos, experiencias y dedicación a lo largo de toda la carrera. Aprendí mucho de ellos, cada uno deja una huella imborrable en mi corazón. Gracias por enseñarme que el conocimiento sí se comparte.

A mi tutor de monografía, Carlos Emilio Cabrera Matajira, gracias por su paciencia, por sus valiosas orientaciones las cuales fueron de una gran ayuda para la realización de este trabajo. Gracias por el tiempo dedicado para revisar cada detalle, cada observación y por compartir su experiencia y sabiduría para lograr que este trabajo fuera posible y sentirme orgullosa de este resultado.

Infinitas gracias a todos los que así sea con un granito de arena aportaron para lograr llegar a esta meta final.

Gracias.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biernbaum, E. N., Gnezda, A., Akbar, S., Franklin, R., Venturelli, P. A., Mckillip, J. L., & Graphical, †. (2021). *Lactoferrin as an antimicrobial against Salmonella enterica and Escherichia coli O157:H7 in raw milk*. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- Chang, M. N., Wei, J. Y., Hao, L. Y., Ma, F. T., Li, H. Y., Zhao, S. G., & Sun, P. (2020). Effects of different types of zinc supplement on the growth, incidence of diarrhea, immune function, and rectal microbiota of newborn dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 6100–6113. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17610>
- Chocobar Reyes, E. J., & Barreda Medina, R. F. (2025). Estructuras metodológicas PICO y PRISMA 2020 en la elaboración de artículos de revisión sistemática: Lo que todo investigador debe conocer y dominar. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 8525–8543. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16491
- Cuajungco, M. P., Ramirez, M. S., & Tolmasky, M. E. (2021). Zinc: Multidimensional effects on living organisms. In *Biomedicines* (Vol. 9, Issue 2, pp. 1–26). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9020208>
- Dos Santos, G. F., De Sousa, F. G., Beier, S. L., Mendes, A. C. R., & Leão, A. M. G. e. S. (2023). Escherichia coli O157:H7 strains in bovine carcasses and the impact on the animal production chain. In *Brazilian Journal of Microbiology* (Vol. 54, Issue 3, pp. 2243–2251). Institute for Ionics. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01034-x>
- Feldmann, H. R., Williams, D. R., Champagne, J. D., Lehenbauer, T. W., & Aly, S. S. (2019). Effectiveness of zinc supplementation on diarrhea and average daily gain in preweaned dairy calves: A double-blind, blockrandomized, placebo-controlled clinical trial. *PLoS ONE*, 14(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219321>
- Fernández, M., Thompson, J., & Calle, A. (2024). Novel feed additive delivers antimicrobial copper and influences fecal microbiota in pigs. *Microbiology Spectrum*, 12(6). <https://doi.org/10.1128/spectrum.04280-23>
- Higgins, J., Sterne, J., Savović, J., Page MJ, Hróbjartsson A, Boutron I, Reeves B, & Eldridge S. A. (2016). *Cochrane Methods. Cochrane Database of Systematic Reviews* (J. Chandler, J. McKenzie, I. Boutron, & V. Welch, Eds.). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD201601>
- Hunduma, D., Amenu, K., Desta, H., Grace, D., Agga, G. E., & Kerro Dego, O. (2024). Prevalence and Antimicrobial Resistance of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella, and the Prevalence of Staphylococcus aureus in Dairy Cattle and Camels under Pastoral Production System. *Antibiotics*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/antibiotics13010026>
- Lee, K. Y., Atwill, E. R., Li, X., Feldmann, H. R., Williams, D. R., Weimer, B. C., & Aly, S. S. (2024). Impact of zinc supplementation on phenotypic antimicrobial resistance of fecal commensal bacteria from pre-weaned dairy calves. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54738-x>
- Liu, J., Ma, F., Degen, A., & Sun, P. (2023). The Effects of Zinc Supplementation on Growth, Diarrhea, Antioxidant Capacity, and Immune Function in Holstein Dairy Calves. *Animals*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/ani13152493>

- Ma, F. T., Wo, Y. Q. L., Shan, Q., Wei, J. Y., Zhao, S. G., & Sun, P. (2020). Zinc-methionine acts as an anti-diarrheal agent by protecting the intestinal epithelial barrier in postnatal Holstein dairy calves. *Animal Feed Science and Technology*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114686>
- Mukaddes, B., Hizlisoy, H., Gungor, C., Dishan, A., Disli, H. B., Al, S., Onmaz, N. E., Yildirim, Y., & Gonulalan, Z. (2022). Escherichia coli serogroups in slaughterhouses: Antibiotic susceptibility and molecular typing of isolates. *International Journal of Food Microbiology*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109673>
- Murray, S. A., Amachawadi, R. G., Norman, K. N., Lawhon, S. D., Nagaraja, T. G., Drouillard, J. S., & Scott, H. M. (2021). Effects of zinc and menthol-based diets on co-selection of antibiotic resistance among e. Coli and enterococcus spp. in beef cattle. *Animals*, 11(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ani11020259>
- OMS. (2015). *ESTIMACIONES DE LA OMS SOBRE LA CARGA MUNDIAL DE ENFERMEDADES DE TRANSMISIÓN ALIMENTARIA*.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Roth, J. A., & Galyon, J. (2024). Food security: The ultimate one-health challenge. In *One Health* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.100864>
- Scaletti, R. W., Trammell, D. S., Smith, B. A., & Harmon, R. J. (2003). Role of dietary copper in enhancing resistance to Escherichia coli mastitis. *Journal of Dairy Science*, 86(4), 1240–1249. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73708-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73708-4)
- Tao, L., Liu, K., Li, J., Zhang, Y., Cui, L., Dong, J., Meng, X., Zhu, G., & Wang, H. (2022). Selenomethionine alleviates NF-κB-mediated inflammation in bovine mammary epithelial cells induced by Escherichia coli by enhancing autophagy. *International Immunopharmacology*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.108989>
- Tarekegn, A. A., Mitiku, B. A., & Alemu, Y. F. (2023). Escherichia coli O157:H7 beef carcass contamination and its antibiotic resistance in Awi Zone, Northwest Ethiopia. *Food Science and Nutrition*, 11(10), 6140–6150. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3550>
- Wo, Y., Jin, Y., Gao, D., Ma, F., Ma, Z., Liu, Z., Chu, K., & Sun, P. (2022). Supplementation With Zinc Proteinate Increases the Growth Performance by Reducing the Incidence of Diarrhea and Improving the Immune Function of Dairy Calves During the First Month of Life. *Frontiers in Veterinary Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.911330>