

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA
POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL**

**BIODISPONIBILIDAD, COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD
DE LA LECHE EN RUMIANTES AL UTILIZAR DIFERENTES
FUENTES DE COBRE Y ZINC EN LA DIETA
TESIS**

Que como requisito parcial

para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

NOÉ GALINDO DORANTES

Bajo la supervisión de: **MAXIMINO HUERTA BRAVO, Ph.D.**



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2025.

**Biodisponibilidad, comportamiento productivo y calidad de la leche en
rumiantes al utilizar diferentes fuentes de cobre y zinc en la dieta**

Tesis realizada por **NOÉ GALINDO DORANTES** bajo la supervisión del comité
asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



Ph.D. MAXIMINO HUERTA BRAVO

ASESOR:



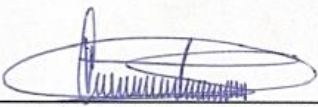
Ph.D. AGUSTÍN RUÍZ FLORES

ASESOR:



Dr. JOSÉ ORLANDO JIMÉNEZ PAEZ

LECTOR EXTERNO:



Dr. CLAUDIO VITE CRISTOBAL

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
DEDICATORIAS	VII
AGRADECIMIENTOS.....	VIII
DATOS BIOGRÁFICOS	IX
RESUMEN GENERAL.....	X
GENERAL ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
HIPÓTESIS	2
OBJETIVOS	2
<i>Objetivo general</i>	2
<i>Objetivos específicos</i>	2
LITERATURA CITADA	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
LOS MINERALES TRAZA.....	6
MINERALES TRAZA INORGÁNICOS	6
MINERALES TRAZA ORGÁNICOS.....	8
MINERALES HIDROXILADOS	9
BIODISPONIBILIDAD DE MINERALES TRAZA	10
LITERATURA CITADA.....	12
3. MILK PRODUCTION IN HOLSTEIN COWS FED DIETS SUPPLEMENTED WITH ORGANIC AND INORGANIC SOURCES OF COPPER AND ZINC: SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS	15
4. MINERALES EN PLASMA, PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LECHE CAPRINA UTILIZANDO DIFERENTE FUENTE DE COBRE Y ZINC	29
RESUMEN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ABSTRACT.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INTRODUCCIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

MATERIALES Y MÉTODOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANIMALES Y DIETAS EXPERIMENTALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TOMA Y PROCESAMIENTO DE MUESTRAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CONCLUSIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE CUADROS

Capítulo 2.

Cuadro 1. Funciones principales de los minerales traza. 7

Cuadro 2. Factores que afectan la biodisponibilidad de minerales traza en la producción animal. 11

Capítulo 3.

Cuadro 1. Características de los estudios incluidos en el meta-análisis. 19

Cuadro 2. Resultados del análisis de subgrupos para el contenido de grasa en leche. 23

Cuadro 3. Prueba de regresión de Egger para evaluar el sesgo de publicación. 24

Capítulo 4.

Cuadro 1. Composición de la dieta experimental. 34

Cuadro 2. Composición de la premezcla mineral. 35

Cuadro 3. Efecto de la fuente de cobre y zinc sobre la concentración de minerales en plasma sanguíneo de cabras lecheras y valores de concentración normal. 38

Cuadro 4. Efecto de la fuente de cobre y zinc sobre producción de leche y sus características en cabras lecheras. 40

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 3.

- Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 para la identificación y selección de estudios. 20
- Figura 2. Efecto estimado de la producción de leche en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con inorgánico. 21
- Figura 3. Efecto estimado para consumo de alimento en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con inorgánico en la dieta. 21
- Figura 4. Efecto estimado de contenido de proteína de leche en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con inorgánico. 22
- Figura 5. Efecto estimado del contenido grasa en leche de vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con inorgánico. 23
- Figura 6. Gráfico de embudo de contorno mejorado para evaluar el sesgo de publicación en producción de leche de vacas Holsteín suplementadas con minerales orgánicos o inorgánicos en la dieta. 24

Capítulo 4.

- Figura 1. Concentración de cobre y zinc en plasma (ppm) de cabras alimentadas con diferente fuente de estos minerales durante la lactancia a través de los diferentes periodos de muestreo. 39
- Figura 2. Concentración de grasa en leche de cabras alimentadas con diferente fuente de cobre y zinc en la dieta a través de los diferentes periodos de muestreo. 42

Dedicatorias

A mis hijas **América Selene** y **Daniela Fernanda** porque son el motor que me impulsa a seguir adelante. Espero que puedan cumplir todo lo que se propongan, las amo.

A **Laura** por permitirme cumplir con esta meta que estaba pendiente, gracias por tu amor y apoyo.

A los que se adelantaron en esta vida **Gloria** y **Romualdo**, mis padres, y mi abuelo **Medardo**, porque sus consejos son el faro que guía mi andar.

A mis hermanos **Antonia**, **Cándido**, **Estela**, **Eleazar** y **Medardo** por brindarme su apoyo y cariño.

A mis sobrinos **Concepción**, **Diego Armando**, **Carlos Emiliano**, **Iván**, **Sebastián**, **Inés** y **Liliana**, espero que sea una pequeña motivación para que cumplan sus objetivos.

“NO HAY NADA IMPOSIBLE PARA AQUEL QUE LO INTENTA”

ALEJANDRO MAGNO

Agradecimientos

A dios y la vida por permitirme llegar a este momento.

A la **Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Zootecnia y al Posgrado en Producción Animal** por la oportunidad de formarme en sus aulas.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías**, por el financiamiento otorgado durante mis estudios doctorales.

A los integrantes de mi comité asesor **Ph. D. Maximino Huerta Bravo, Ph. D. Agustín Ruíz Flores y Dr. José Orlando Jiménez Paez**, por sus atinadas sugerencias durante la realización de mis estudios.

Al **Dr. Claudio Vite Cristóbal**, por sus acertadas sugerencias en la revisión de esta tesis.

A todos los catedráticos del PPA por compartir sus conocimientos durante este proceso de formación.

A mi amigo **M.C. Constantino Romero Márquez**, por tu invaluable apoyo en este proceso, muchas gracias.

A mi paisano y amigo **Dr. Enrique Genaro Martínez González**, por su apoyo y guía.

A mis amigos estudiantes Alvin, Pedro Ramos, Pedro Arriaga, Andrea, Narda, Guadalupe, Carlos Mireles, Mauricio y José Luis Vélez, por compartir esas mañanas de café y por el apoyo durante la fase de campo.

A todos lo que de alguna manera hicieron que mi estancia en el PPA fuera agradable, infinitas gracias.

Datos biográficos

Datos personales

Nombre	Noé Galindo Dorantes
Fecha de nacimiento	10 de noviembre de 1979
Lugar de nacimiento	Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca
CURP	GADN791110HOCLRX09
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	405025

Desarrollo académico

Doctorado en Ciencias (2022-2025)	Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Maestría en Ciencias (2003-2005)	Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura (1998-2002)	Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

BIODISPONIBILIDAD, COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD DE LA LECHE EN RUMIANTES AL UTILIZAR DIFERENTES FUENTES DE COBRE Y ZINC EN LA DIETA¹

Los minerales traza o microminerales son nutrimentos esenciales en las funciones fisiológicas de los rumiantes, por lo que al cumplir con los requerimientos en cada una de las etapas productivas se logra un mejor desempeño productivo del ganado. En el mercado existen opciones para suplementar los minerales traza en los rumiantes, las que difieren en biodisponibilidad y costo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el desempeño productivo y la calidad de la leche de cabras y vacas al suministrar nuevas fuentes de minerales traza en la dieta. Se realizó un meta-análisis para determinar el efecto de suministrar minerales traza, orgánicos vs. inorgánicos, en la producción de leche de vacas Holstein. El metaanálisis mostró que no hubo diferencia en producción de leche de vacas Holstein al adicionar minerales traza orgánicos vs. inorgánicos. Después se evaluó el efecto de suministrar minerales hidroxilados vs. sulfatos, en la concentración de minerales en plasma sanguíneo, y la producción y composición de leche en cabras. Para ello, se utilizaron 30 cabras de dos o más partos y tres razas, divididas en dos tratamientos, T1 consistió en suministrar cobre y zinc de fuentes sulfatadas, en T2 se suministraron hidroxilados. Se tomaron muestras de sangre antes y después de la suplementación para su centrifugación y posterior análisis de minerales por medio de espectrofotometría de absorción atómica. Las muestras de leche se tomaron semanalmente y se analizaron mediante el MilkoScanTM FT 120. La concentración de cobre en suero sanguíneo fue menor ($P<0.05$) en cabras que recibieron minerales hidroxilados. Por otro lado, la concentración de grasa en la leche fue mayor ($P<0.05$) en cabras que recibieron minerales hidroxilados, únicamente en el primer y último muestreo. La fuente de minerales traza no afecta el desempeño productivo de cabras lecheras, no obstante, provoca un ligero incremento en la calidad de leche.

Palabras clave: minerales traza, pequeños rumiantes, producción de leche.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Innovación Ganadera, Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Noé Galindo Dorantes

Director: Maximino Huerta Bravo

GENERAL ABSTRACT

BIOAVAILABILITY, PRODUCTIVE PERFORMANCE, AND MILK QUALITY IN GOATS WHEN USING DIFFERENT SOURCES OF COPPER AND ZINC IN THE DIET¹

Trace minerals or microminerals are essential nutrients in the physiological functions of ruminants, so meeting the requirements at each stage of production leads to better livestock performance. There are diverse commercial options to supplement trace minerals in ruminants, and they differ in bioavailability and cost. The objective of this research was to evaluate the productive performance and milk quality of goats and cows when new sources of trace minerals were supplied in their diet. A meta-analysis was conducted to investigate the impact of supplying trace minerals, organic vs. inorganic, on milk production of Holstein cows. The meta-analysis showed that there was no difference in milk production in Holstein cows when organic vs. inorganic trace minerals were added. The effect of supplying hydroxylated minerals vs. sulfates on blood plasma mineral concentration and milk production and composition in goats was then evaluated. For this purpose, thirty goats from two or more births and three breeds were used, divided into two treatments. Treatment one consisted of supplying copper and zinc from sulfated sources, while treatment two consisted of supplying hydroxylated minerals. Blood samples were taken before and after supplementation for mineral analysis by atomic absorption spectrophotometry. Milk samples were recorded weekly and analyzed using the MilkoScanTM FT 120. The concentration of copper in blood serum was lower ($P<0.05$) in goats that received hydroxylated minerals. On the other hand, the fat concentration in milk was higher ($P<0.05$) in goats that received hydroxylated minerals, only at the initial and final sampling. The source of trace minerals does not affect the productive performance of dairy goats, but it does cause a slight increase in milk quality.

Keywords: trace minerals, small ruminants, milk production

¹ Doctoral Thesis in Livestock Innovation, Graduate Program in Animal Production, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Noé Galindo Dorantes

Advisor: Maximino Huerta Bravo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La población humana mundial ha crecido aceleradamente los 100 años más recientes, se espera que para 2050 supere los 10,000 millones de personas (Bhagat & Singh, 2022). El crecimiento de la población, el aumento en los ingresos de las economías en vías de desarrollo, la exigencia de una producción alimentaria más sostenible y el cambio de hábitos alimenticios debido a una mayor concienciación, aumentarían la demanda de proteínas y productos de origen animal en un futuro próximo (Bhagat & Singh, 2022). Ante este escenario, surge la necesidad de buscar alternativas para mejorar la productividad pecuaria mediante el aprovechamiento eficiente y sostenible de los insumos disponibles (Caton et al., 2025; Brugger & Windisch, 2015; Miranda et al., 2025). Este enfoque permite superar el triple reto que representa la suplementación mineral al ganado, optimizar la salud y productividad animal, asegurar la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria del consumidor, lo que se conoce como una sola salud (Silva et al., 2022).

La nutrición representa el mayor porcentaje (70%) de los costos de producción en la producción animal y tiene un gran impacto en la salud y productividad pecuaria (Ensley, 2020). En este escenario, la nutrición mineral, en particular, tiene una relevancia importante para el éxito y rentabilidad de los sistemas de producción animal (Miranda et al., 2025).

Los minerales representan aproximadamente 5% de la masa corporal del animal, sin embargo, la demanda de cada mineral difiere en cantidad de acuerdo con la concentración en el cuerpo del animal o sus productos (Miranda et al., 2025). Con este criterio, los minerales se clasifican de acuerdo con la cantidad que el cuerpo requiere. El grupo de macrominerales compuesto por fósforo (P), calcio (Ca), sodio (Na), cloro (Cl), azufre (S), potasio (P) y magnesio (Mg), se demanda en grandes cantidades (g kg^{-1} MS o %), mientras que los microminerales o minerales traza, se requieren en pequeñas cantidades (mg kg^{-1} MS, ppm, ppb o $\mu\text{g kg}^{-1}$), como cobalto (Co), hierro (Fe), cobre (Cu), yodo (I), zinc (Zn), manganeso (Mn) y selenio (Se) (Kumar et al., 2025; NASEM, 2016), también se puede considerar a cromo (Cr), molibdeno (Mo) y níquel (Ni) (Arthington & Ranches, 2021). Los minerales traza se

requieren en muy pequeñas cantidades y, son esenciales para varios componentes del sistema inmune (Yatoo et al., 2013); asimismo, son esenciales para que las funciones fisiológicas y metabólicas del cuerpo se lleven a cabo correctamente y los animales tengan un comportamiento productivo y reproductivo adecuado (Bhagat & Singh, 2022; Bhanderi et al., 2010). La apropiada nutrición mineral es importante para mantener la salud y productividad de los animales, y garantiza un mejor desempeño reproductivo (Davy et al., 2019). El cobre y zinc juegan un papel preponderante en la síntesis de hormonas, son cofactores en una gran cantidad de enzimas que ayudan a mejorar el sistema inmune de los animales, además de que su deficiencia es muy común en ganado, por lo que es necesario asegurar su correcta suplementación (Springman et al., 2021).

Hipótesis

La adición de fuentes hidroxiladas de cobre y zinc en las dietas de cabras lecheras mejora la biodisponibilidad de los minerales suplementados, y en consecuencia incrementa la producción y calidad de la leche.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de la inclusión de diferentes fuentes de cobre y zinc en la dieta de cabras lecheras sobre su comportamiento productivo y su biodisponibilidad mineral.

Objetivos específicos

- a) Evaluar el efecto de la inclusión dietética de cobre y zinc provenientes de sulfatos o hidroxilados sobre la producción y composición de leche de cabras.
- b) Estimar la concentración mineral en plasma sanguíneo de cabras lecheras alimentadas con cobre y zinc hidroxilados o provenientes de sulfatos.
- c) Revisar y analizar los resultados de la investigación al utilizar diferentes fuentes de minerales traza en la producción de leche de vacas.

La tesis se compone de cuatro capítulos. En el **Capítulo 2** se aborda una revisión de literatura sobre las diferentes fuentes que se utilizan para suministrar minerales traza al ganado. En el **Capítulo 3** se presenta un metaanálisis donde se determina

el efecto de suplementar cobre y zinc de fuentes orgánicas e inorgánicas en la producción y calidad de leche en vacas. Finalmente, en el **Capítulo 4** se evalúa el efecto de suplementar cobre y zinc en la biodisponibilidad de ambos minerales, así como en la producción y calidad de leche de cabras al utilizar fuentes hidroxiladas o a base de sulfatos.

Literatura citada

- Arthington, J. D., & Ranches, J. (2021). Trace mineral nutrition of grazing beef cattle. *Animals*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
- Bhagat, S., & Singh, S. (2022). Nanominerals in nutrition: recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111703>
- Bhanderi, B. M., Pande, A. M., & Parnerkar, S. (2010). Influence of organic and inorganic forms of trace minerals supplementation at different doses on daily weight gain and serum mineral levels in male calves. *Livestock Research for Rural Development*, 8(22).
- Brugger, D., & Windisch, W. M. (2015). Environmental responsibilities of livestock feeding using trace mineral supplements. *Animal Nutrition*, 1(3), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.08.005>
- Caton, J. S., Crouse, M. S., Dahlen, C. R., Ward, A. K., Diniz, W. J. S., Hammer, C. J., Swanson, R. M., Hauxwell, K. M., & Reynolds, L. P. (2025). Review: micronutrient supply, developmental programming, and strategic supplementation in ruminant livestock. *Animal*, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101563>
- Davy, J. S., Forero, L. C., Shapero, M. W. K., Rao, D. R., Becchetti, T. A., Koopman Rivers, C., Stackhouse, J. W., Deatley, K. L., & McNabb, B. R. (2019). Mineral status of California beef cattle. *Translational Animal Science*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.1093/tas/txy114>
- Ensley, S. (2020). Evaluating mineral status in ruminant livestock. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, 36(3), 525–546. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.08.009>
- Kumar, R., Singh, K. D., Chauhan, S. S., Verma, M. K., Verma, A. K., Singh, J., Srivastva, S., & Kumar, P. (2025). Trace minerals in growth, production and reproduction in farm animals. *The Indian Journal of Animal Reproduction*, 46(1), 1–12. <https://doi.org/10.48165/ijar.2025.46.01.1>
- Miranda, E. S., Negrão, F. de M., Oliveira, J. C. A. de, Santo, V. H. T. do E., Carvalho, J. de, Machado, A. K. A., Duarte, T. E. da C., & Cabral, L. da S. (2025). Brazilian livestock and mineral nutrition in beef cattle: a review. *REVISTA DELOS*, 18(67), e4979. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n67-023>
- NASEM. (2016). Nutrient requirements of beef cattle, 8th Revised Edition. In *Nutrient Requirements of Beef Cattle, 8th Revised Edition*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19014>
- Silva, F. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, M. H. M. e., López-Alonso, M., & Pierangeli, M. A. P. (2022). Trace elements in beef cattle: a review of the scientific approach from one health perspective. *Animals*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/ani12172254>

- Springman, S. A., Drewnoski, M. E., & Funston, R. N. (2021). Effects of hydroxy trace mineral supplementation on gain and reproductive performance in beef heifers. *Livestock Science*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104425>
- Yatoo, M. I., Saxena, A., Deepa, P. M., Habeab, B. P., Devi, S., Jatav, R. S., & Dimri, U. (2013). Role of trace elements in animals: A review. *Veterinary World*, 6(12), 963–967. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2013.963-967>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Los minerales traza

Los minerales, usualmente se clasifican en macro minerales (Ca, P, K, Na, Cl y Mg) y minerales traza (Cu, Zn, Co, Se, Mn, I, Fe y Cr) (Bhalakiya et al., 2019). El término minerales traza (MT) se refiere a los minerales que se agregan a la dieta de los animales de producción o de compañía en pequeñas cantidades, generalmente en mg kg^{-1} o $\mu\text{g kg}^{-1}$ MS (Byrne & Murphy, 2022). Estos minerales (Cuadro 1) están involucrados en funciones estructurales, fisiológicas, catalíticas, regulatorias, procesos bioquímicos y fortalecimiento del sistema inmune. Por estas razones, es importante cubrir los requerimientos de los animales (Byrne & Murphy, 2022; Larson, 2005; López-Alonso, 2012; Palomares, 2022). Habitualmente, los ingredientes utilizados en la alimentación animal tienen un muy bajo contenido de MT, por ello la adición externa de estos nutrientes es importante para una correcta nutrición (Oladejo & Ogunkunle, 2025). Debido a su amplia disponibilidad en el mercado y su bajo costo, los MT generalmente se suplementan como sales inorgánicas, usualmente óxidos, sulfatos, cloruros y carbonatos (Bhalakiya et al., 2019; Cheek et al., 2024; Spears, 1996). Sin embargo, debido a su estructura química, alta solubilidad y la tendencia a formar compuestos con otros minerales, su biodisponibilidad es baja. Por tanto, se han formulado complejos de MT que ayudan a mejorar la absorción de estos elementos esenciales para el ganado (Ibraheem et al., 2023; Spears, 1996).

Minerales traza inorgánicos

Las fuentes inorgánicas de minerales traza (ITM), como óxidos y sulfatos, empezaron a utilizarse de manera limitada en la alimentación del ganado en 1930, actualmente se utilizan ampliamente para formular alimentos comerciales para cubrir las necesidades de los animales en producción (Spears, 2013). La amplia utilización de ITM se debe a su alta disponibilidad en el mercado y a su relativo bajo costo.

Cuadro 1. Funciones principales de los minerales traza

Mineral	Función
Cobre (Cu)	Respiración celular, pigmentación de tejidos, formación de hemoglobina (ceruloplasmina) y desarrollo de tejido conectivo. Componente esencial de metaloenzimas. Protege contra el estrés oxidativo.
Hierro (Fe)	Componente de la función hemo de la hemoglobina, la cual transporta el oxígeno de los pulmones hacia los tejidos. Las enzimas mitocondriales requieren Fe para producir energía celular a través del ciclo de Krebs. Transporte de oxígeno por la mioglobina a células y tejidos del músculo. Importante para la función inmune del cuerpo y el metabolismo de lípidos
Manganeso (Mn)	Constituyente de múltiples enzimas. Componente de la matriz orgánica del hueso y esencial en el desarrollo del cartílago. Involucrado en el metabolismo del calcio y carbohidratos. Necesario para utilización de biotina, vitamina B1 y vitamina C. Existe una asociación metabólica entre Mn y colina, la cual afecta el metabolismo de grasa en el hígado.
Zinc (Zn)	Activa un gran número de enzimas y es componente importante de muchas metaloenzimas. Está involucrado en la replicación celular y en el desarrollo del cartílago y del hueso. Involucrado en la síntesis de proteínas, metabolismo de carbohidratos y muchas otras reacciones bioquímicas.

Fuente: Ibraheem et al. (2023)

La pureza de las fuentes de ITM puede variar ampliamente. Por tanto, la disponibilidad biológica de los elementos minerales proporcionados por los ITM es variable, los sulfatos y cloruros tienen una mayor disponibilidad, seguidos por los

carbonatos, y por último los óxidos (Arthington & Ranches, 2021). Por esta razón, frecuentemente se requieren altas cantidades para cubrir los requerimientos de los animales lo que conduce a un desbalance de nutrientes y posibles problemas de toxicidad (Byrne & Murphy, 2022). Estas desventajas de los ITM han permitido la búsqueda de nuevas alternativas que permitan cubrir las necesidades de MT con una mayor eficiencia.

Minerales traza orgánicos

A mediados de la década de 1990 se incrementó el interés por mejorar la nutrición de MT en la industria ganadera, procurando incrementar su biodisponibilidad por medio de nuevas fuentes, como los minerales traza orgánicos (OTM) (Arthington & Ranches, 2021; Hilal et al., 2016).

El término orgánico se refiere al proceso de unir un ion metálico (Zn, Cu, Mn) con una molécula orgánica (aminoácidos, proteínas, polisacáridos) llamada quelato o ligando por medio de enlaces covalentes. Los quelatos se generan al hacer reaccionar una sal mineral con una mezcla enzimáticamente preparada de: a) un aminoácido en específico, b) un pequeño número de aminoácidos y c) un grupo no especificado de aminoácidos, bajo condiciones controladas (Gayathri & Panda, 2018; Patton, 1997). La Asociación Americana de Control de Alimentos Oficiales (AFFCO, 2024), define los OTM en siete diferentes compuestos:

- 1) Ion metálico más un aminoácido en específico:** se obtienen por la combinación de una sal mineral con un aminoácido en específico. Se absorben muy eficientemente en el intestino animal. Ejemplo: zinc-metionina, cobre-lisina.
- 2) Ion metálico más aminoácidos:** formado por la reacción de un átomo (zinc) con una mezcla de varios aminoácidos. Cada molécula sigue siendo un metal unido a un aminoácido, pero hay varios aminoácidos en la mezcla. Ejemplo: zinc-metionina, zinc-leucina, zinc-cisteína.
- 3) Ion metálico más aminoácidos quelatados:** se obtiene al hacer reaccionar una sal mineral soluble con aminoácidos, guardando una relación molar; un

mol de metal con uno a tres (preferiblemente dos) moles de aminoácidos. El peso molecular de los quelatos no debe superar los 800 Dalton.

- 4) **Metal proteinatos:** resultan de la reacción de una sal mineral soluble con aminoácidos o proteínas hidrolizadas. El producto final puede tener aminoácidos, dipéptidos, tripéptidos u otros derivados de las proteínas.
- 5) **Metal polisacáridos:** resultan de recubrir el ion metálico con moléculas de polisacáridos. Son compuestos más grandes basados en cadenas de azúcares simples que son altamente solubles en el intestino.
- 6) **Metal propionatos:** se obtienen por la combinación de sales minerales solubles con ácidos orgánicos solubles como el propionato. Como resultado se obtienen productos con alta solubilidad.
- 7) **Complejos derivados de levaduras:** otras fuentes de minerales orgánicos son las levaduras enriquecidas con MT. La más común es la levadura fortificada con selenio unido a metionina (seleno-metionina). Recientemente ha ganado popularidad la levadura enriquecida con cromo.

El uso de OTM para reemplazar una parte de ITM se ha utilizado con más frecuencia durante años recientes (Spears, 2013). Se han propuesto algunos mecanismos por los cuales los OTM pueden incrementar la biodisponibilidad de los minerales. Los compuestos formados (ion metálico + quelato) pueden incrementar la absorción pasiva de minerales en el intestino al reducir las interacciones con otras moléculas que pudieran obstaculizar la absorción de los minerales. Otra explicación es que el complejo resultante entre el mineral y la sustancia orgánica puede incrementar la solubilidad del mineral en agua y lípidos, lo que mejora su absorción pasiva (Byrne & Murphy, 2022). La mayoría de la comunidad científica está de acuerdo en que los OTM incrementan la biodisponibilidad en especies no rumiantes, sin embargo, esta ventaja no está claramente definida en rumiantes (Arthington & Ranches, 2021).

Minerales hidroxilados

Recientemente, una nueva categoría de minerales traza inorgánicos está disponible para la industria ganadera, conocidos como minerales traza hidroxilados (HTM) (Arthington & Ranches, 2021). El hidroxiclورو de cobre ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) se introdujo

en 1995. El hidroxiclорuro de zinc ($Zn_5(OH)_8Cl_2$) y el hidroxiclорuro de manganeso ($Mn_2(OH)_3Cl$) en 2012 (Spears, 2013).

Los HTM se consideran formas inorgánicas con enlaces covalentes similares a los OTM. Se producen utilizando procesos patentados mediante reacción de fuentes puras de minerales (Zn, Cu y Mn) con agua, como fuente de grupos hidroxilo y ácido clorhídrico como fuente de cloruros (Reddy et al., 2021; Wagner et al., 2016). Estos minerales tienen baja solubilidad en agua, pero se disuelven en condiciones ácidas, similares a las condiciones presentes en el abomaso, no son higroscópicos, por lo tanto, son menos reactivos con los ingredientes de los alimentos balanceados y de las premezclas vitamínicas y minerales, lo que resulta en mejor estabilidad de las vitaminas y una menor oxidación de lípidos (Arthington & Ranches, 2021; Reddy et al., 2021; Spears, 2013). Muchas de las interacciones entre MT ocurren en el rumen. Una ventaja de los HTM es su capacidad para sobrepasar el rumen, lo que minimiza las interacciones que normalmente ocurren (Reddy et al., 2021). Su habilidad para sobrepasar las condiciones ruminales y evitar las interacciones que ahí suceden, puede explicar la alta biodisponibilidad reportada para los HTM en comparación con los ITM (Spears, 2013).

Biodisponibilidad de minerales traza

Una mayor eficiencia en la utilización de los minerales traza está estrechamente relacionada a su biodisponibilidad (Bhalakiya et al., 2019; Reddy et al., 2021). La biodisponibilidad de un nutriente se puede definir como aquella porción ingerida, absorbida, transportada al sitio de acción y que puede utilizarse para las funciones fisiológicas y bioquímicas normales de los animales (Byrne & Murphy, 2022; Caldera et al., 2015; Reddy et al., 2021). La biodisponibilidad de un mineral depende de su accesibilidad, absorbibilidad, retenibilidad y funcionalidad (Reddy et al., 2021). Varios factores afectan de manera directa o indirecta el contenido de minerales en las plantas y, por tanto, afectan la cantidad disponible para los animales que dependen del consumo de estas plantas. Se ha documentado que las condiciones del suelo influyen en la concentración de minerales de los alimentos (Bhalakiya et

al., 2019). En el Cuadro 2 se listan algunos de los factores que afectan la biodisponibilidad de minerales (Byrne & Murphy, 2022).

Cuadro 2. Factores que afectan la biodisponibilidad de minerales traza en la producción animal.

Factor	Subfactor
Animal	• Edad
	• Raza
	• Estado de salud
	• Rumiante o no rumiante
	• Estado fisiológico (crecimiento, preñez, lactación)
	• Nutrición previa
	• Nivel y tipo de producción
	• Sexo
Químicos	• Tipo de enlace (covalente, iónico)
	• Pureza de las fuentes minerales
	• Diferencias en las tasas de disociación del mineral
	• Tamaño de partícula del mineral
	• Condiciones o método de fabricación
	• Solubilidad
	• Estabilidad
Dietéticos	• Composición química de la dieta (contenido mineral)
	• Composición de los ingredientes de la dieta y presencia de antagonistas
	• Nivel de suplementación de los minerales
	• Digestibilidad general de la dieta
	• Presencia de promotores de crecimiento
	• Contenido de vitaminas
Ambiental	• Estrés ambiental
	• Método de alimentación (seca o húmeda)
	• Alojamiento y equipo
	• Nivel de consumo de minerales
	• Calidad y cantidad de agua proporcionada

Existen diferentes métodos para evaluar la biodisponibilidad de los minerales, ya que el método que sirve para un mineral, puede ser adecuado o no para otro. El referente estándar utilizado en la evaluación deberá ser una fuente de alta biodisponibilidad o la fuente utilizada de manera frecuente (Cha et al., 2025). Si bien es cierto que los resultados varían entre estudios es importante dilucidar los mecanismos por los que se absorben los minerales, en la medida en que esto se realice, se logrará una suplementación más eficiente de los minerales, con los consecuentes beneficios ambientales.

Literatura Citada

- AFFCO. (2024). *Official publication of the Association of American Feed Control Officials*. Champaign, IL.
- Arthington, J. D., & Ranches, J. (2021). Trace mineral nutrition of grazing beef cattle. *Animals*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
- Bhagat, S., & Singh, S. (2022). Nanominerals in nutrition: recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111703>
- Bhalakiya, N., Haque, N., Patel, P., & Joshi, P. (2019). Role of trace minerals in animal production and reproduction. *International Journal of Livestock Research*, 9(9), 1–12. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20190222105609>
- Bhanderi, B. M., Pande, A. M., & Parnerkar, S. (2010). Influence of organic and inorganic forms of trace minerals supplementation at different doses on daily weight gain and serum mineral levels in male calves. *Livestock Research for Rural Development*, 8(22).
- Byrne, L., & Murphy, R. A. (2022). Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a review. *Animals*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/ani12151981>
- Caldera, E., Engle, T. E., Wagner, J. J., Archibeque, S. L., & Rollin, B. (2015). *Dissertation examining in vitro and in vivo characteristics of intellibond and sulfate forms of copper, zinc, and manganese Submitted by*. Colorado State University. Fort Collins, Colorado.
- Caton, J. S., Crouse, M. S., Dahlen, C. R., Ward, A. K., Diniz, W. J. S., Hammer, C. J., Swanson, R. M., Hauxwell, K. M., & Reynolds, L. P. (2025). Review: micronutrient supply, developmental programming, and strategic supplementation in ruminant livestock. *Animal*, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101563>
- Cha, M., Ma, X., Liu, Y., Xu, S., Diao, Q., & Tu, Y. (2025). Effects of replacing inorganic sources of copper, manganese, and zinc with different organic forms on mineral status, immune biomarkers, and lameness of lactating cows. *Animals*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/ani15020271>
- Cheek, R. A., Kegley, E. B., Russell, J. R., Reynolds, J. L., Midkiff, K. A., Galloway, D., & Powell, J. G. (2024). Supplemental trace minerals as complexed or inorganic sources for beef cattle during the receiving period. *Journal of Animal Science*, 102. <https://doi.org/10.1093/jas/skae056>
- Davy, J. S., Forero, L. C., Shapero, M. W. K., Rao, D. R., Becchetti, T. A., Koopman Rivers, C., Stackhouse, J. W., Deatley, K. L., & McNabb, B. R. (2019). Mineral status of California beef cattle. *Translational Animal Science*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.1093/tas/txy114>

- Ensley, S. (2020). Evaluating mineral status in ruminant livestock. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, 36(3), 525–546. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.08.009>
- Gayathri, S., & Panda, N. (2018). Chelated minerals and its effect on animal production: A review. *Agricultural Reviews*, 39(4), 314–320. <https://doi.org/10.18805/ag.r-1823>
- Hilal, E., Elkhairey, M., & Osman, A. (2016). The role of zinc, manganese and copper in rumen metabolism and immune function: A Review Article. *Open Journal of Animal Sciences*, 06(04), 304–324. <https://doi.org/10.4236/ojas.2016.64035>
- Ibraheem, M., Kvidera, S. K., Fry, R. S., & Bradford, B. J. (2023). Meta-analysis of the effects of sulfate versus hydroxy trace mineral source on nutrient digestibility in dairy and beef cattle. *Journal of Dairy Science*, 106(4), 2386–2394. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22490>
- Kumar, R., Singh, K. D., Chauhan, S. S., Verma, M. K., Verma, A. K., Singh, J., Srivastva, S., & Kumar, P. (2025). Trace minerals in growth, production and reproduction in farm animals. *The Indian Journal of Animal Reproduction*, 46(1), 1–12. <https://doi.org/10.48165/ijar.2025.46.01.1>
- Larson, C. K. (2005). *Role of trace minerals in animal production: what do I need to know about trace minerals for beef and dairy cattle, horses, sheep and goats. In Nutrition Conference by Department of Animal Science, The University of Tennessee.*
- López-Alonso, M. (2012). Trace minerals and livestock: not too much not too little. *International Scholarly Research Network Veterinary Science*, 2012, 1–18. <https://doi.org/10.5402/2012/704825>
- Miranda, E. S., Negrão, F. de M., Oliveira, J. C. A. de, Santo, V. H. T. do E., Carvalho, J. de, Machado, A. K. A., Duarte, T. E. da C., & Cabral, L. da S. (2025). Brazilian livestock and mineral nutrition in beef cattle: a review. *REVISTA DELOS*, 18(67), e4979. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n67-023>
- NASEM. (2016). Nutrient Requirements of Beef Cattle, 8th Revised Edition. In *Nutrient Requirements of Beef Cattle, 8th Revised Edition*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19014>. Washington, DC.
- Oladejo, E., & Ogunkunle, N. (2025). The roles of dietary organic trace minerals on animal antioxidative status, gut health, and environmental sustainability: a review. *Journal of Agricultural Science*, 17(1). <https://doi.org/10.5539/j>
- Palomares, R. A. (2022). Trace minerals supplementation with great impact on beef cattle immunity and health. *Animals*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/ani12202839>
- Patton, R. (1997). Efficacy of chelated minerals; review of Literature. In *Proceedings of the 2 Nd Conference of the Nutrition Advisory Group of the*

American Zoo and Aquarium Association on Zoo and Wildlife Nutrition, 16–34. Galisteo, NM.

- Reddy, B. V. V., Nayak, S., Khare, A., Pal, R. P., Sharma, R., Chourasiya, A., Namdeo, S., & Thakur, S. (2021). Role of hydroxy trace minerals on health and production of livestock: a review. *Journal of Livestock Science*, 12(4), 279–286. <https://doi.org/10.33259/jlivestsci.2021.279-286>
- Silva, F. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, M. H. M. e., López-Alonso, M., & Pierangeli, M. A. P. (2022). Trace elements in beef cattle: a review of the scientific approach from one health perspective. *Animals*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/ani12172254>
- Spears, J. W. (1996). Organic trace minerals in ruminant nutrition. *Animal Feed Science Technology*, 58, 151–163.
- Spears, J. W. (2013). Advances in ruminant trace mineral nutrition. *Cornell Nutrition Conference*, 22–24. Ithaca, NY.
- Springman, S. A., Drewnoski, M. E., & Funston, R. N. (2021). Effects of hydroxy trace mineral supplementation on gain and reproductive performance in beef heifers. *Livestock Science*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104425>
- Wagner, J. J., Engle, T. E., Caldera, E., Neuhold, K. L., Woerner, D. R., Spears, J. W., Heldt, J. S., & Laudert, S. B. (2016). The effects of zinc hydroxychloride and basic copper chloride on growth performance, carcass characteristics, and liver zinc and copper status at slaughter in yearling feedlot steers. *Professional Animal Scientist*, 32(5), 570–579. <https://doi.org/10.15232/pas.2015-01480>
- Yatoo, M. I., Saxena, A., Deepa, P. M., Habeab, B. P., Devi, S., Jatav, R. S., & Dimri, U. (2013). Role of trace elements in animals: a review. *Veterinary World*, 6(12), 963–967. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2013.963-967>

Este artículo fue publicado por la revista Tropical and subtropical agroecosystems

3. MILK PRODUCTION IN HOLSTEIN COWS FED DIETS SUPPLEMENTED WITH ORGANIC AND INORGANIC SOURCES OF COPPER AND ZINC: SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS

PRODUCCIÓN DE LECHE EN VACAS HOLSTEIN ALIMENTADAS CON DIETAS SUPLEMENTADAS CON FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DE COBRE Y ZINC: REVISIÓN SISTEMÁTICA Y META-ANÁLISIS

Noé Galindo-Dorantes¹, Maximino Huerta-Bravo^{1*}, Agustín Ruíz-Flores¹, Enrique Genaro Martínez-González², Alvin Gustavo Carrillo-Hurtado¹ and José Orlando Jiménez-Paez³

¹*Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Estado de México. C.P 56230. Email: galindodn@gmail.com , maximino_h@hotmail.com*, aruizf@chapingo.mx , alvin_cahu@hotmail.com*

²*Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Apdo. Post. Núm. 90, Carretera Federal México-Texcoco km. 38.5, Universidad Autónoma Chapingo. C.P. 56235. Email: enriquemartinez@ciestaam.edu.mx*

³ *SynBios, Av. Hércules #500-10, Polígono empresarial, Santa Rosa Jauregui, Querétaro, C.P. 76220, México*

**Corresponding author*



Review [Revisión]

MILK PRODUCTION IN HOLSTEIN COWS FED DIETS SUPPLEMENTED WITH ORGANIC AND INORGANIC SOURCES OF COPPER AND ZINC: SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS †

[PRODUCCIÓN DE LECHE EN VACAS HOLSTEIN ALIMENTADAS CON DIETAS SUPLEMENTADAS CON FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DE COBRE Y ZINC: REVISIÓN SISTEMÁTICA Y META-ANÁLISIS]

Noé Galindo-Dorantes¹, Maximino Huerta-Bravo^{1*}, Agustín Ruiz-Flores¹, Enrique Genaro Martínez-González², Alvin Gustavo Carrillo-Hurtado¹ and José Orlando Jiménez-Paez³

¹Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Estado de México. C.P 56230, México. Email: galindodn@gmail.com, maximino_h@hotmail.com, aruizf@chapingo.mx, alvin_cahu@hotmail.com

²Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Apdo. Post. Núm. 90, Carretera Federal México-Texcoco km. 38.5, Universidad Autónoma Chapingo. C.P. 56235, México. Email: enriquemartinez@ciestaam.edu.mx

³SynBios, Av. Hércules #500-10, Polígono empresarial, Santa Rosa Jauregui, Querétaro, C.P. 76220, México

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Preventing trace mineral deficiency in Holstein cows has a high impact on production, health, and reproduction. Inorganic sources of trace minerals are generally used because they are more economical compared to organic sources. **Objective.** A meta-analysis will be performed to determine the effect of including organic copper (Cu) and zinc (Zn) in the diet on milk production and the composition of Holstein cows. **Methodology.** Data were obtained from fourteen refereed scientific studies published between 2012 and 2023. The effect was determined by standardized mean difference (SMD) between the experimental treatment (Cu and Zn from organic sources) and the control treatment (Cu and Zn from sulfates). **Results.** The inclusion of organic Cu and Zn in the diet of cows did not significantly influence ($P>0.05$) milk production in Holstein cows. Feed intake and milk protein and fat percentages were not affected either. **Implications.** The study focused solely on measuring the effect on productive behavior and milk quality in Holstein cattle. However, minerals play a preponderant role in the correct functioning of the immune system of animals. **Conclusion.** The results indicate that organic and inorganic Cu and Zn sources can be used without affecting the performance of dairy cows.

Key Words: Dairy cows; trace minerals; organic trace minerals; performance.

RESUMEN

Antecedentes. Prevenir la deficiencia de minerales traza en vacas Holstein tiene un alto impacto en la producción, salud y reproducción. Por lo general, se utilizan fuentes inorgánicas de minerales traza debido a que son más económicas en comparación a las fuentes orgánicas. **Objetivo.** Realizar un metaanálisis para determinar el efecto de incluir Cobre (Cu) y Zinc (Zn) orgánicos en la dieta sobre la producción y composición

† Submitted February 4, 2025 – Accepted March 31, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6179>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = N. Galindo-Dorantes: <https://orcid.org/0000-0002-2529-6141>; M. Huerta-Bravo: <https://orcid.org/0000-0002-9150-8971>; A. Ruiz-Flores: <https://orcid.org/0000-0001-8267-2107>; E.G. Martínez-González: <https://orcid.org/0000-0001-9312-5002>; A.G. Carrillo-Hurtado: <https://orcid.org/0000-0002-6882-6517>; J.O. Jiménez-Paez: <https://orcid.org/0000-0002-2187-6381>

de la leche de vacas Holstein. **Metodología.** Los datos se obtuvieron de catorce estudios científicos arbitrados, publicados entre 2012 y 2023. El efecto se determinó mediante la diferencia de medias estandarizadas (SMD) entre el tratamiento experimental (Cu y Zn provenientes de fuentes orgánicas) y el tratamiento control (Cu y Zn provenientes de sulfatos). **Resultados.** La inclusión de Cu y Zn orgánicos en la dieta de vacas no influyó ($P>0.05$) significativamente la producción de leche en vacas Holstein. Tampoco se afectaron el consumo de alimento y el porcentaje de proteína y grasa de la leche. **Implicaciones.** El estudio se enfocó únicamente en medir el efecto sobre el comportamiento productivo y calidad de leche en ganado Holstein. Sin embargo, los minerales juegan un papel preponderante correcto funcionamiento del sistema inmune de los animales. **Conclusión.** Los resultados indican que se pueden utilizar fuentes de Cu y Zn orgánicas e inorgánicas sin afectar el comportamiento productivo de vacas lecheras.

Palabras clave: Vacas lecheras; minerales traza orgánicos; comportamiento productivo.

INTRODUCCIÓN

Los minerales traza (MT) representan una pequeña cantidad en la dieta de las vacas lecheras, sin embargo juegan un papel muy importante en la producción (Mion *et al.*, 2022). Los MT realizan múltiples funciones biológicas: sirven como cofactores de metaloenzimas, participan en diferentes procesos fisiológicos como el balance de la regulación oxidativa, síntesis de vitaminas y proteínas, función inmune de las células, son necesarios para la síntesis de sangre, estructura de las hormonas, y para mantener una función reproductiva normal (Spears y Weiss, 2008; Rabiee *et al.*, 2010; Nemec *et al.*, 2012; Goff, 2018; Ogilvie *et al.*, 2022). De manera frecuente, los MT se agregan en las dietas en forma de sales inorgánicas como sulfatos, carbonatos, cloruros y óxidos, debido a su amplia disponibilidad en el mercado y su bajo costo (Rabiee *et al.*, 2010; Bach *et al.*, 2015; Mion *et al.*, 2022). Sin embargo, el enlace iónico presente en los MT suplementados en forma de sulfatos se disocia en el tracto gastrointestinal (TGI), lo que permite la interacción con otras moléculas, lo que puede reducir su biodisponibilidad (Spears, 2003; Goff, 2018). Conforme el nivel de producción de leche se ha incrementado, la suplementación de MT ha tomado mayor importancia debido a la exigencia a la que se someten las vacas lecheras (Bach *et al.*, 2015). Una alternativa para disminuir las interacciones en el TGI de las fuentes inorgánicas de MT y aumentar su biodisponibilidad, son las fuentes orgánicas, las cuales son quelatadas entre una fuente inorgánica con una molécula como péptidos, aminoácidos, polisacáridos, propionato, acetato o picolinato (Chester-jones *et al.*, 2013; Goff, 2018; Mion *et al.*, 2022; da Silva *et al.*, 2023). Otra alternativa son los minerales hidroxilados, los cuales son una fuente inorgánica con enlaces covalentes (Mion *et al.*, 2022). Los enlaces covalentes y la estructura en forma de anillo de estas moléculas protegen a los minerales de las reacciones no deseadas, particularmente en el rumen, incrementando su biodisponibilidad (Spears, 2003; Mion *et al.*, 2022).

Actualmente hay una creciente preocupación sobre la posible contaminación mineral, por lo que hay un considerable interés en la discusión sobre cómo reducir la excreción de minerales sin ningún efecto negativo en el rendimiento productivo de los animales (da Silva *et al.*, 2023). Diversos investigadores (Osorio *et al.*, 2016; Faulkner *et al.*, 2017; Roshanzamir *et al.*, 2020; Mion *et al.*, 2022) evaluaron la suplementación de minerales orgánicos en el comportamiento productivo de vacas lecheras. Sin embargo, factores como el tipo de minerales orgánicos utilizados, reemplazo total o parcial de minerales inorgánicos, mezcla de dos o más fuentes de minerales orgánicos, hacen poco concluyente la comparación de minerales orgánicos vs inorgánicos (Mion *et al.*, 2022). En el estudio realizado por Bach *et al.* (2015) no se encontraron diferencias significativas en producción de leche de vacas alimentadas con minerales traza inorgánicos comparadas con vacas que recibieron minerales orgánicos. Similamente, Yasui *et al.* (2019) no encontraron diferencias en el comportamiento productivo de vacas lecheras a mitad de la lactación cuando se alimentaron con dietas suplementadas con minerales traza inorgánicos en comparación con minerales traza orgánicos. Por otro lado, Nocek *et al.* (2006) encontraron una mayor producción de leche cuando sustituyeron los minerales traza inorgánicos por orgánicos.

Los resultados de las investigaciones han sido poco concluyentes, por lo que, el objetivo del presente trabajo fue evaluar mediante un metaanálisis el efecto de la suplementación con minerales traza orgánicos e inorgánicos en la producción y calidad de leche en vacas Holstein.

METODOLOGÍA

Búsqueda de literatura

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura para identificar los trabajos de investigación que evaluaron el efecto de incluir Cobre (Cu) y Zinc (Zn) a partir de fuentes orgánicas e inorgánicas en la producción de leche de vacas Holstein. La

pregunta de investigación se construyó utilizando la metodología PICO (Navarro y García, 2007), Donde i) la Población objeto de estudio fue el ganado Holstein productor de leche; ii) la Intervención se focalizó en la suplementación de minerales traza de fuentes orgánicas a través de las dietas proporcionadas a las vacas; iii) la Comparación fue con las dietas suplementadas con minerales traza a base de fuentes inorgánicas; y iv) los resultados fueron la producción (kg/d) y la calidad de la leche (% de grasa y proteína). La búsqueda se realizó en las plataformas Scopus, PubMed y ScienceDirect; el periodo de búsqueda comprendió de enero 2012 a diciembre 2023. Para la búsqueda se utilizó la combinación de las siguientes palabras clave: dairy cow, cattle, Holstein, organic trace mineral, chelated mineral, performance, milk production y yield. La identificación, cribado y selección de artículos se realizó bajo la metodología PRISMA 2020 (Figura 1).

Criterios de inclusión y exclusión

La sentencia de búsqueda dio como resultado un total de 696 trabajos de investigación a través de las diferentes plataformas. En un primer filtro se eliminaron los artículos duplicados haciendo uso de la plataforma asistida por inteligencia artificial Rayyan; posteriormente se eliminaron los artículos que cumplieron uno o más criterios de exclusión: 1) revisiones de literatura; 2) resúmenes de congresos; 3) trabajos de investigación que utilizaron una raza diferente a Holstein; y 4) estudios que combinaron fuentes de minerales traza orgánicas con inorgánicas. Para incluir los estudios en la base de datos para el análisis final, se consideró que cumplieran con los siguientes criterios de inclusión: 1) estudios originales arbitrados publicados en revistas científicas indexadas; 2) trabajos publicados en idioma inglés; 3) estudios que proporcionaron los minerales traza mediante una dieta integral; 4) investigaciones que reportaron y midieron producción de leche (kg/día/vaca) y calidad de leche (% de proteína y grasa); 5) estudios que reportaron la dosis (mg/kg), fuente y tipo de mineral traza suplementado; 6) estudios que reportaron la media de producción de leche, grasa y proteína, error estándar de la media (SEM) y el número de vacas utilizadas por tratamiento (n).

Extracción de datos

Después de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, fueron seleccionados 14 artículos científicos (Tabla 1). De cada uno de los artículos seleccionados se extrajo la siguiente información: a) autor y año de publicación, b) país de origen, c)

número de parto, d) dosis suplementada de Cu y Zn (mg/kg MS), e) tipo de fuente suplementada (inorgánica, orgánica), f) periodo de suplementación, g) número de ordeños al día, h) porcentaje de proteína cruda (PC) en la dieta. Posteriormente, de cada artículo científico se consideraron para el análisis las siguientes variables de respuesta: consumo de alimento (kg/d), producción de leche por vaca (kg/d) y porcentaje de grasa y proteína en leche. De cada variable de respuesta se obtuvo la siguiente información: 1) media del tratamiento control (minerales inorgánicos) y tratamientos experimentales (minerales orgánicos), 2) n (número de animales utilizados), 3) Error Estándar de la Media (EEM) o Desviación Estándar (DE). Cuando se reportó la DE, ésta se tomó directamente y cuando se reportó el EEM, la DE se calculó mediante la ecuación propuesta por Higgins et al. (2019): $DE = EEM * \sqrt{n}$.

Cálculos y análisis estadísticos

Los análisis se realizaron mediante el paquete estadístico metafor (Viechtbauer, 2010) en el software R versión 4.2.2. Los efectos de suplementar minerales orgánicos en consumo de alimento, producción de leche y contenido de proteína y grasa en leche se evaluaron por la diferencia de medias ponderada (DMP) entre el tratamiento experimental (minerales orgánicos) y el tratamiento control (minerales inorgánicos). Las medias de tratamiento se ponderaron mediante el inverso de la varianza obtenida mediante el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML), se utilizó un modelo de efectos aleatorios.

Heterogeneidad y sesgo de publicación

Los estadísticos Q e I^2 se utilizaron para evaluar la heterogeneidad presente entre estudios (Higgins et al., 2003). El sesgo de publicación se evaluó mediante la prueba de Egger's, así como por medio del Funnel Plot (Harrer et al., 2021). Se consideró baja heterogeneidad cuando los valores de I^2 fueron menores que 25%, de 25 a 50% indican una moderada heterogeneidad y valores de I^2 mayores que 50% indican alta heterogeneidad (Higgins et al., 2003).

Análisis de subgrupos

Las fuentes de heterogeneidad se evaluaron mediante análisis de subgrupos cuando los valores de I^2 fueron mayores que 50%. El subgrupo utilizado fue el número de parto (primíparas, múltiparas-primíparas y múltiparas).

Tabla 1. Características de los estudios incluidos en el metaanálisis.

Referencia	Parto	Periodo de suplementación (días)	Número Ordeños	Fuente	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Banadaky <i>et al.</i> , (2021)	P	21	3	Sulfatos	15	42
Banadaky <i>et al.</i> , (2021)	P	21	3	Bonzaplex	5.8	16.6
Banadaky <i>et al.</i> , (2021)	P	21	3	Availa Zinpro	5.8	16.6
Cortinhas <i>et al.</i> , (2012)	M y P	80	2	Sulfatos	24.2	47
Cortinhas <i>et al.</i> , (2012)	M y P	80	2	Novo Bovigold	24.2	47
Del Valle <i>et al.</i> , (2015)	M	21	2	Sulfatos	11	61.6
Del Valle <i>et al.</i> , (2015)	M	21	2	DSMChelated	11	61.6
El Ashry <i>et al.</i> , (2015)	M	90	2	Sulfatos	10	15
El Ashry <i>et al.</i> , (2015)	M	90	2	Metionina	10	15
Faulkner <i>et al.</i> , (2016)	M	16	2	Sulfatos	20	80
Faulkner <i>et al.</i> , (2016)	M	16	2	Glycinatos	20	80
Gomes da Silva <i>et al.</i> , (2022)	M y P	56	2	Sulfatos	10.5	43
Gomes da Silva <i>et al.</i> , (2022)	M y P	56	2	Proteinatos	5.27	21.5
Mion <i>et al.</i> , (2022)	M	156	2	Sulfatos	15.7	63
Mion <i>et al.</i> , (2022)	P	156	2	Sulfatos	15.7	63
Mion <i>et al.</i> , (2022)	M	156	2	Proteinatos	15.7	63
Mion <i>et al.</i> , (2022)	P	156	2	Proteinatos	15.7	63
Nemec <i>et al.</i> , (2012)	M y P	84	2	Sulfatos	17	85
Nemec <i>et al.</i> , (2012)	M y P	84	2	Metionina	17	85
Osorio <i>et al.</i> , (2019)	M	30	3	Sulfatos	11	75
Osorio <i>et al.</i> , (2019)	M	30	3	Availa Zinpro	11	75
Pomport <i>et al.</i> , (2020)	M	70	2	Sulfatos	1042	4200
Pomport <i>et al.</i> , (2020)	M	70	2	Sulfatos	680	1360
Pomport <i>et al.</i> , (2020)	M	70	2	Bioplex	680	1360
Roshanzamir <i>et al.</i> , (2019)	M	100	3	Sulfatos	22.3	101
Roshanzamir <i>et al.</i> , (2019)	M	100	3	Glycinatos	22.7	102
Roshanzamir <i>et al.</i> , (2019)	M	100	3	Metionina	22.2	104
Roshanzamir <i>et al.</i> , (2019)	M y P	305	2	Sulfatos	11.3	37.3
Roshanzamir <i>et al.</i> , (2019)	M y P	305	2	Polisacáridos	11.2	37.3
Yasui <i>et al.</i> , (2018)	M	42	2	Sulfatos	8.3	55.2
Yasui <i>et al.</i> , (2018)	M	42	2	Mintrex/metionina	8.3	54.9
Yasui <i>et al.</i> , (2018)	M	42	2	Sulfatos	16.7	76.2
Yasui <i>et al.</i> , (2018)	M	42	2	Mintrex/metionina	16.2	74.2
Zhao <i>et al.</i> , (2015)	M	180	3	Sulfatos	12	50
Zhao <i>et al.</i> , (2015)	M	180	3	Metionina	12	50

M= Multipara, P= Primípara

RESULTADOS

Atributos de los estudios

En la base de datos utilizada en este metaanálisis el periodo de suplementación osciló de 16 a 305 d. Cuando los estudios reportaron más de una medición, cada una de ellas se consideró en el análisis. Los estudios con vacas de primer parto fueron 13.3%, de dos o más partos representaron 60% y los que combinaron vacas de primer parto y de dos o más partos fueron 26.7%. La fuente de minerales inorgánicos en la totalidad de los

estudios fueron sulfatos, mientras que para suplementar los minerales orgánicos se utilizaron fuentes como metionina, polisacáridos, glycinatos y proteinatos, entre otros. Las dosis suplementadas de cobre en forma de sulfatos oscilaron de 8.3 a 1042 mg/kg MS, zinc fue de 15 a 4200 mg/kg MS y para manganeso fue de 20 a 1100 mg/kg MS; mientras que para los minerales orgánicos fue de 5.27 a 680 mg/kg MS, 15 a 1360 mg/kg MS y 9.15 a 680 mg/kg MS, respectivamente. Las fuentes de minerales traza orgánicos fueron muy variables entre los estudios (10 productos diferentes).

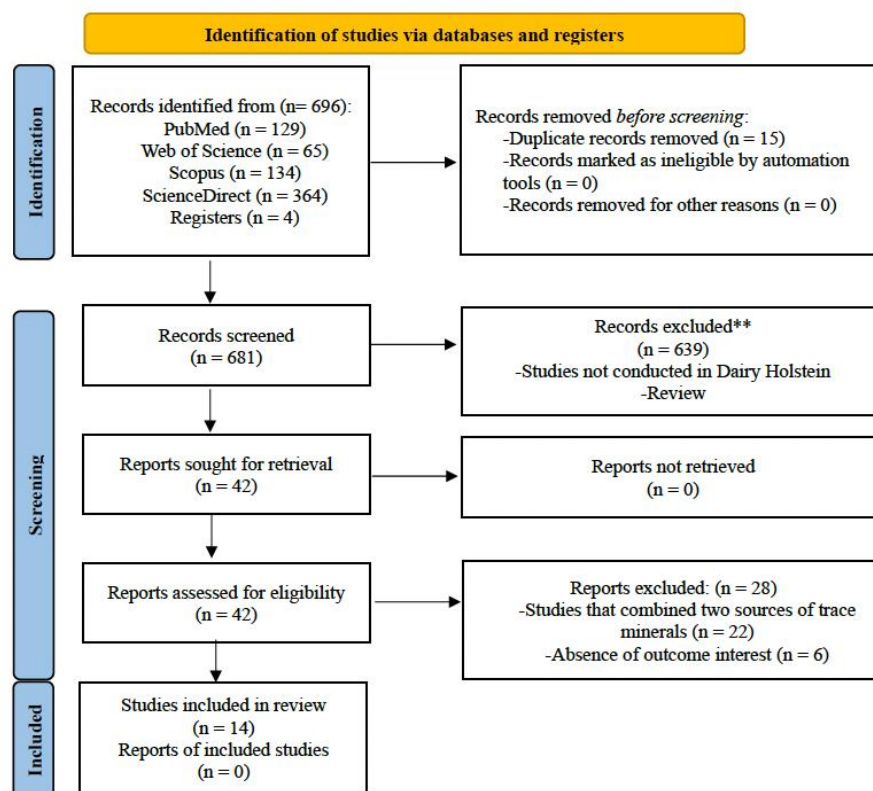


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 para la identificación y selección de estudios (Page *et al.*, 2021).

Producción de leche

Al realizar el metaanálisis se excluyó el estudio de Cortinhas *et al.* (2012) al considerarse como un outlier después realizar el análisis de sensibilidad. La variación de la heterogeneidad entre estudios se estimó en $\tau^2=0.02$ (IC95%: 0.0-0.07), con un $I^2=0\%$ (IC95%: 0.0-48.0%) y el intervalo de predicción osciló entre [-0.24 a 0.51]. La inclusión de minerales orgánicos en la dieta de vacas lecheras no afectó ($P>0.05$) la producción de leche. Sin embargo, se puede observar una ligera tendencia a incrementar ($P=0.07$) la producción de leche al utilizarse minerales orgánicos (Figura 2).

Consumo de alimento

La varianza de heterogeneidad entre estudios se estimó en $\tau^2=0.04$ (IC95%: 0.0-0.33), con I^2 igual a 27.4% (IC95%: 0.0- 59.6%), el intervalo de predicción para consumo de alimento osciló de [-0.49 a 0.48]. Estos resultados sugieren la heterogeneidad entre estudios es baja (Higgins *et al.*, 2003). La fuente de minerales traza (orgánicos, inorgánicos) en la dieta de vacas Holstein no afectó ($P=0.96$) el consumo de alimento (Figura 3).

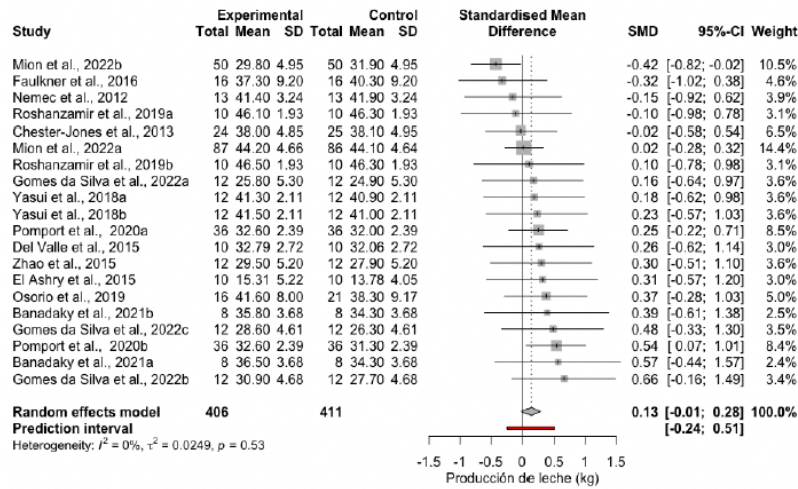


Figura 2. Efecto estimado de la producción de leche en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con Inorgánico.

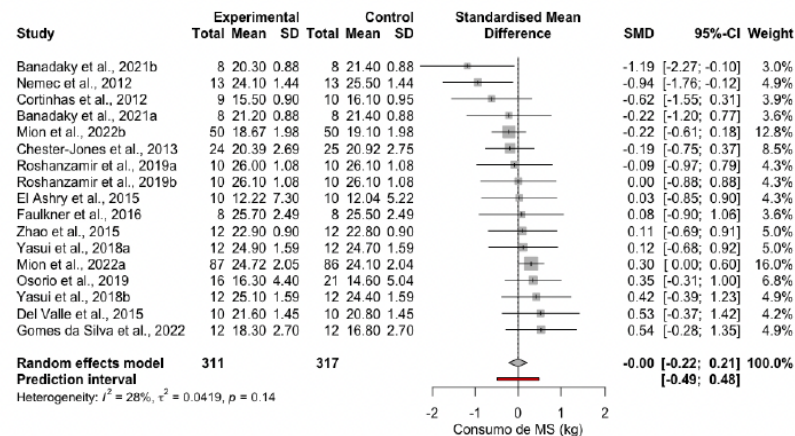


Figura 3. Efecto estimado para consumo de alimento en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con Inorgánico en la dieta.

Proteína

La Figura 4 muestra que el uso de minerales orgánicos en comparación con minerales

inorgánicos no afecta ($P=0.58$) el contenido de proteína en la leche de vacas Holstein. La heterogeneidad entre estudios ($I^2=20\%$) se considera baja (Higgins *et al.*, 2003).

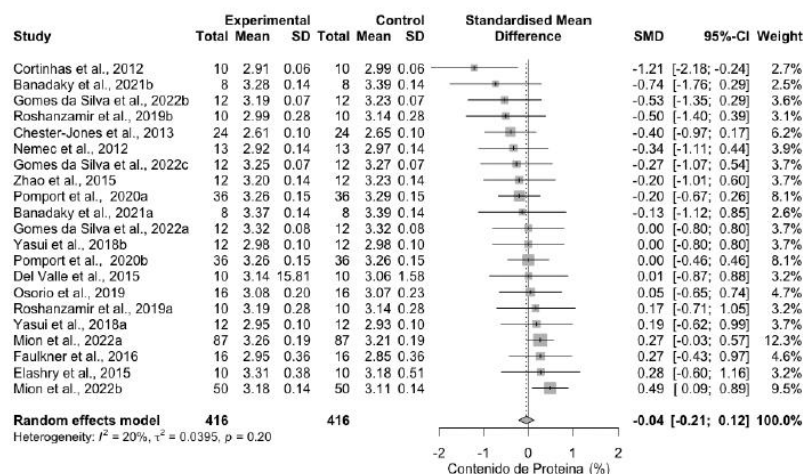


Figura 4. Efecto estimado de contenido de proteína de leche en vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con Inorgánico.

Grasa

La utilización de minerales orgánicos en la dieta de vacas Holstein en comparación con minerales orgánicos no influyó ($P=0.25$) en el contenido de grasa en leche (Figura 5). La heterogeneidad entre estudios ($I^2=57\%$) se considera moderada (Higgins *et al.*, 2003) y significativa ($P<0.01$), por lo que para esta variable se realizó un análisis de subgrupos (Tabla 2).

Análisis de subgrupos

En la tabla 2 se resumen los resultados para el análisis de subgrupos para contenido de grasa en leche (%). En el subgrupo de tipo de parto hay una ligera tendencia ($P=0.08$), en el caso de los subgrupos número de ordeños y días en leche no fueron significativos. Por otro lado, el periodo de suplementación influyó ($P=0.024$) en el contenido de leche en grasa.

Sesgo de publicación

La tabla 3 y Figura 6 muestran que la prueba de regresión de Egger para evaluación de asimetría en el gráfico de embudo no fue significativa ($P>0.05$) para producción de leche, consumo de materia seca y grasa, lo que indica que no hay sesgo de publicación. Por otro lado, en la tabla 3 se puede observar un sesgo de publicación para el caso de proteína ($P<0.05$).

La heterogeneidad fue baja para producción de leche (0%), consumo de materia seca (28%) y proteína (20%). Sin embargo, se presentó heterogeneidad moderada para el caso de contenido de grasa en leche (57%), por lo que se realizó un análisis de subgrupos.

DISCUSIÓN

Producción de leche

Los minerales traza como Cu y Zn, generalmente se incluyen en la dieta del ganado en forma de sulfatos, algunos estudios sugieren que fuentes orgánicas de estos minerales mejoran la producción y la salud (Cope *et al.*, 2009; Bach *et al.*, 2015; Osorio *et al.*, 2016). En el presente metaanálisis, la utilización de Cu y Zn orgánico no influyó en la producción de leche de vacas Holstein, aunque los resultados sugieren una ligera tendencia a mejorar la producción de leche ($P=0.07$) cuando se utilizan minerales traza orgánicos en la dieta que cuando se utilizan sulfatos. Mion *et al.* (2022) no observaron diferencias en la producción de leche de vacas multiparas, pero las vacas primiparas produjeron una menor cantidad de leche cuando se suplementaron con una dieta con base en minerales orgánicos que cuando consumieron una dieta suplementada con minerales inorgánicos. Resultados similares observaron Roshanzamir *et al.* (2020) cuando utilizaron metionina y glicina para proporcionar Cu y Zn orgánicos a vacas

lecheras. Yasui *et al.* (2019) no observaron diferencias en la producción de leche de vacas Holstein a la mitad de la lactancia cuando se alimentaron con Cu, Zn y Mn a base de sulfatos u orgánicos por seis semanas. Por otro lado, en un metaanálisis realizado por Rabiee *et al.* (2010) se observaron incrementos de 1 kg/d de leche en vacas Holstein cuando se les proporcionaron dietas suplementadas con minerales orgánicos en comparación con las vacas que recibieron dietas suplementadas con minerales traza inorgánicos. Así mismo, Osorio *et al.* (2016) observaron un

incremento en la producción de leche de vacas suplementadas con minerales traza orgánicos entre 15 y 20 d posparto. En un resumen de 12 estudios, Kellogg *et al.* (2004) observaron un incremento de 1.3 kg/d de leche en vacas suplementadas con Zn orgánico en comparación con las vacas suplementadas con Zn inorgánico. La variabilidad de los resultados en producción de leche al suplementar minerales traza puede estar relacionada a la gran diversidad de fuentes orgánicas y a los diseños de experimentos.

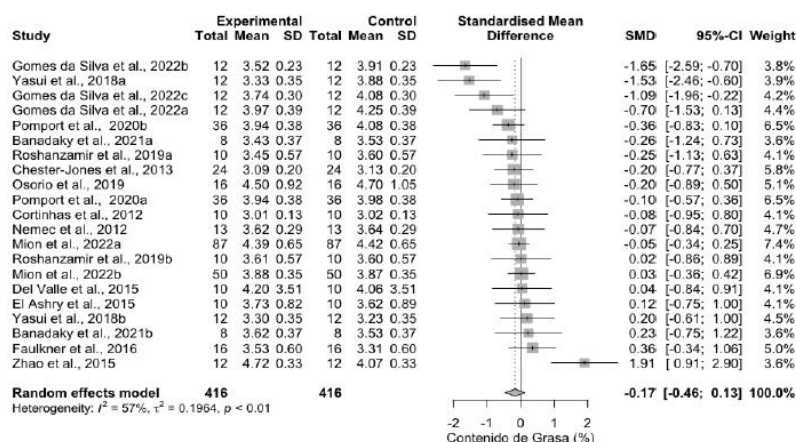


Figura 5. Efecto estimado del contenido grasa en leche de vacas Holstein cuando se utiliza Cu y Zn orgánico en comparación con inorgánico.

Tabla 2. Resultados del análisis de subgrupos para el contenido de grasa en leche.

Subgrupo	SMD	95%IC	I ²	P-value
Tipo de parto				0.080
Multiparas	-0.0143	-0.4491; 0.4206	61.7%	
Primiparas	0.0183	-0.3501; 0.3866	0.0%	
Multi/Primiparas	-0.5791	-1.2278; 0.0697	53.8%	
Número Ordeños				0.186
3	0.2150	-0.6427; 1.0728	65.7%	
2	-0.2629	-0.5632; 0.0374	52.7%	
Periodo Suplem. (días)				0.0243
0 a 30	0.0463	-0.2945; 0.3872	0%	
31 a 60	-0.9262	-1.8581; 0.0058	65.9%	
61+	0.0461	-0.2837; 0.2035	42.8%	
Días en Leche				0.1023
0 a 100	-0.3882	-0.7645; -0.0119	47.6%	
101 a 200	0.3033	-1.2888; 1.8955	82%	
201 a 305	-0.0097	-0.2554; 0.2359	0%	

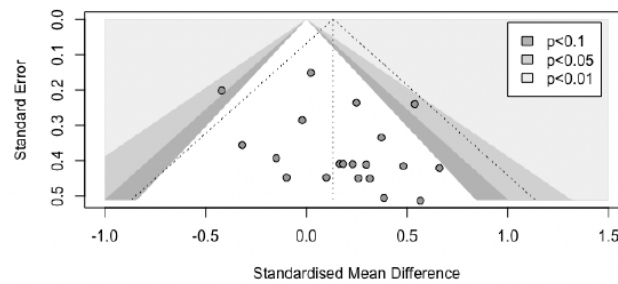


Figura 6. Gráfico de embudo de contorno mejorado para evaluar el sesgo de publicación en producción de leche de vacas holstein suplementadas con minerales orgánicos o inorgánicos en la dieta.

Tabla 3. Prueba de regresión de Egger para evaluar el sesgo de publicación.

Variable respuesta	Intercepto	IC 95%	t	P-value
Producción de leche (kg/d)	0.99	-0.13 a 2.1	1.73	0.10
Consumo de MS (kg/d)	-0.87	-2.27 a -0.52	-1.22	0.24
Grasa (%)	-0.47	-2.23 a -1.29	-0.53	0.60
Proteína (%)	-1.75	-2.85 a -0.66	-3.15	0.005

Consumo de alimento

La suplementación con MT orgánicos proporciona una adecuada cantidad de MT a los microorganismos del rumen, favoreciendo la digestibilidad de la fibra y la fermentación ruminal (Galbraith *et al.*, 2016; Guimares *et al.*, 2020), también se pueden ver afectadas la actividad ruminal, la tasa de pasaje y conducta alimenticia de las vacas (Miller *et al.*, 2020). Tales efectos pueden ayudar a explicar las diferencias en el comportamiento productivo de las vacas cuando se suplementan diferentes fuentes de minerales traza (Mion *et al.*, 2022). En el presente estudio no se observaron diferencias en el consumo de alimento de vacas Holstein cuando se les proporcionó una dieta suplementada con minerales traza orgánicos en comparación cuando recibieron una dieta con minerales traza inorgánicos. Resultados similares fueron observados por Zhao *et al.* (2015), Roshanzamir *et al.* (2020) y Pomport *et al.* (2021). Por otro lado, Chester-Jones *et al.* (2013) observaron menor consumo de alimento cuando las vacas se alimentaron con una ración suplementada con una combinación de MT a base de sulfatos-polisacáridos que cuando se les proporcionó una dieta que contenía sulfatos-aminoácidos. El consumo de alimento no se afecta por la fuente de MT utilizada en la dieta de las vacas lecheras Holstein, sin embargo, podría ser interesante investigar los efectos de la fuente de MT en la digestibilidad de materia seca.

Proteína

Los minerales traza se requieren para una gran variedad de procesos biológicos, entre los que se incluyen la síntesis de vitaminas y proteínas (Goff, 2018). La suplementación de minerales orgánicos a base de glicina ha demostrado alterar los perfiles de ácidos grasos en vacas lecheras (Faulkner *et al.*, 2017). En el presente metaanálisis no se observaron diferencias en el porcentaje de proteína en leche de vacas Holstein alimentadas con dietas suplementadas con minerales traza orgánicos en comparación con las vacas alimentadas con minerales inorgánicos. Estos resultados son similares a los reportados por Nemec *et al.* (2012), Bach *et al.* (2015), Yasui *et al.* (2019), Roshanzamir *et al.* (2020) y da Silva *et al.* (2023) quienes no observaron diferencias en el porcentaje de grasa en leche de vacas holstein alimentadas con fuentes de minerales orgánicos en comparación con inorgánicos. Por otro lado, en contraste con nuestros resultados, en el metaanálisis realizado por Rabiee *et al.* (2010) se observó que al suplementar vacas con minerales orgánicos la producción de proteína se incrementó en 0.03 kg/d, resultados que coinciden con El Ashry *et al.* (2012) quienes observaron diferencias en el porcentaje de proteína, 3.18% vs 3.31%, cuando proporcionaron una dieta suplementada con minerales inorgánicos vs orgánicos, respectivamente, a vacas altas productoras.

Grasa

En el presente metaanálisis no se observaron diferencias en el porcentaje de grasa de vacas alimentadas con minerales inorgánicos en comparación con las vacas alimentadas con minerales orgánicos. Estos resultados coinciden con los observados por Nemec *et al.* (2012), Chester-Jones *et al.* (2013) y Roshanzamir *et al.* (2020) quienes no encontraron diferencia en el porcentaje de grasa en leche de vacas alimentadas con minerales orgánicos vs inorgánicos. En contraste, Rabiee *et al.* (2010) observaron que las vacas alimentadas con dietas suplementadas a base de minerales orgánicos incrementaron ($P<0.05$) la producción de grasa en 0.03 kg/d. Por otro lado, Zhao *et al.* (2015) y da Silva *et al.* (2023) observaron una menor producción de grasa en vacas recibiendo una dieta suplementada con minerales orgánicos que aquellas que recibieron la dieta suplementada con minerales inorgánicos, lo anterior puede estar relacionado a que en los dos experimentos las vacas alimentadas con minerales orgánicos tuvieron una mayor producción de leche.

CONCLUSIÓN

La inclusión de cobre y zinc orgánicos en la dieta de vacas Holstein, no influye el consumo, producción y composición de la leche. La falta de hallazgos consistentes puede estar relacionado con la amplia fuente de minerales orgánicos utilizados en los experimentos, la longitud del periodo experimental y la etapa de la curva de lactación en que se encuentren las vacas al momento del experimento.

Acknowledgements

Esta investigación forma parte del trabajo doctoral del primer autor, quien es becario del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Funding. El presente trabajo no recibió financiación.

Conflict of interest statement. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés con respecto a este manuscrito.

Compliance with ethical standards. Debido a la naturaleza del estudio, esto no aplica.

Data availability. Los datos están disponibles con el primer autor en el correo electrónico galindodn@gmail.com, mediante una petición razonable.

Author Contribution Statement (CRediT). N. Galindo-Dorantes: conceptualización, preparación original del proyecto, búsqueda bibliográfica, extracción y análisis de datos, escritura y edición; M. Huerta-Bravo: conceptualización, validación, revisión y edición; A. Ruiz-Flores: revisión y edición; E.G. Martínez-González: Metodología, revisión, validación y edición; A.G. Carrillo-Hurtado: extracción de datos, revisión y edición; J.O. Jiménez-Páez: revisión. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

REFERENCES

- Bach, A., Pinto, A. and Blanch, M., 2015. Association between chelated trace mineral supplementation and milk yield, reproductive performance, and lameness in dairy cattle. *Livestock Science*, 182, pp. 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.10.023>
- Banadaky, M.D., Rajaei-Sharifabadi, H., Hafizi, M., Hashemi, S.A., Kalanaky, S., Fakhrazadeh, S., Shahbedini, S.P., Rezayazdi, K. and Nazaran, M.H., 2021. Lactation responses of Holstein dairy cows to supplementation with a combination of trace minerals produced using the advanced chelate compounds technology. *Tropical Animal Health and Production*, 53, pp.1-9. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02539-5>
- Cope, C.M., Mackenzie, A.M., Wilde, D. and Sinclair, L.A., 2009. Effects of level and form of dietary zinc on dairy cow performance and health. *Journal of Dairy Science*, 92(5), pp.2128-2135. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1232>
- Cortinhas, C.S., Freitas Júnior, J.E.D., Naves, J.D.R., Porcionato, M. A. D. F., Rennó, F.P. and Santos, M.V. D., 2012. Organic and inorganic sources of zinc, copper and selenium in diets for dairy cows: intake, blood metabolic profile, milk yield and composition. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41, pp. 1477-1483. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000600023>
- Chester-Jones, H., Vermeire, D., Brommelsiek, W., Brokken, K., Marx, G. and Linn, J.G., 2013. Effect of trace mineral source on

- reproduction and milk production in Holstein cows. *The Professional Animal Scientist*, 29(3), pp.289-297. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30235-7](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30235-7)
- da Silva, G.G., da Silva Dias, M.S., Takiya, C.S., Nunes, A.T., Del Valle, T.A., Grigoletto, N.T.S. and Rennó, F.P., 2023. Feeding reduced levels of trace minerals in proteinate form and selenium-yeast to transition cows: Performance, trace minerals, and antioxidant status, peripheral neutrophil activity, and oocyte quality. *Journal of Dairy Science*, 106(4), pp.3023-3042. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21939>
- Del Valle, T.A., Jesus, E.F.D., Paiva, P. G. D., Bettero, V.P., Zanferari, F., Acedo, T.S. and Rennó, F.P., 2015. Effect of organic sources of minerals on fat-corrected milk yield of dairy cows in confinement. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 44(3), pp.103-108. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902015000300004>
- DerSimonian, R. and Laird, N., 1986. Meta-analysis in clinical trials. *Controlled clinical trials*, 7(3), 177-188. [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(86\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0197-2456(86)90046-2)
- El Ashry, G.M., Hassan, A.A.M. and Soliman, S.M., 2012. Effect of feeding a combination of zinc, manganese and copper methionine chelates of early lactation high producing dairy cow. *Food and Nutrition Sciences*, 3(8). <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2012.38144>
- Faulkner, M.J., Wenner, B.A., Solden, L.M. and Weiss, W.P., 2017. Source of supplemental dietary copper, zinc, and manganese affects fecal microbial relative abundance in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(2), pp.1037-1044. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11680>
- Galbraith, M.L., Vorachek, W.R., Estill, C.T., Whanger, P.D., Bobe, G., Davis, T.Z. and Hall, J.A., 2016. Rumen microorganisms decrease bioavailability of inorganic selenium supplements. *Biological Trace Element Research*, 171, pp.338-343. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0560-8>
- Guimaraes, O., Wagner, J., Spears, J. and Engle, T., 2020. Influence of trace mineral source on digestion, ruminal volatile fatty acid and soluble mineral on steers fed a dairy type diet balanced to meet requirements for a high producing lactating dairy cow. *Journal of Animal Science*, 98(Suppl 3), pp.133. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa054.231>
- Goff, J.P., 2018. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *Journal of Dairy Science*, 101(4), pp.2763-2813. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13112>
- Harrer, M., Cuijpers, P., Furukawa, T.A. and Ebert, D.D., 2021. *Doing Meta-Analysis with R: A Hands-On Guide*. Boca Raton, FL and London: Chapman and Hall/CRC Press. https://bookdown.org/MathiasHarrer/Doing_Meta_Analysis_in_R/
- Higgins, J. P., Thompson, S.G., Deeks, J.J. and Altman, D.G., 2003. Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327, pp.557-560. <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
- Higgins, J.P., Li, T. and Deeks, J.J., 2019. Choosing effect measures and computing estimates of effect. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*, pp.143-176. <https://doi.org/10.1002/9781119536604.ch6>
- Kellogg, D.W., Tomlinson, D.J., Socha, M.T. and Johnson, A.B., 2004. Effects of zinc methionine complex on milk production and somatic cell count of dairy cows: Twelve-trial summary. *The Professional Animal Scientist*, 20(4), pp.295-301. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31318-8](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31318-8)
- Mion, B., Van Winters, B., King, K., Spricigo, J.F.W., Ogilvie, L., Guan, L. and Ribeiro, E.S., 2022. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(8), pp.6693-6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>

- Miller, M.D., Lanier, J.S., Kvidera, S.K., Dann, H.M., Ballard, C.S. and Grant, R.J., 2020. Evaluation of source of corn silage and trace minerals on rumen characteristics and passage rate of Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 103(10), pp.8864-8879. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18490>
- Navarro, M.F. and García, S.J.M., 2007. Formulación de preguntas clínicas e introducción a la estrategia de búsqueda de información. En Atención Sanitaria Basada en la Evidencia. Su aplicación a la práctica clínica. Consejería de Sanidad de la Región de Murcia. <http://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/136606>
- Nemec, L.M., Richards, J.D., Atwell, C.A., Diaz, D.E., Zanton, G.I. and Gressley, T.F., 2012. Immune responses in lactating Holstein cows supplemented with Cu, Mn, and Zn as sulfates or methionine hydroxy analogue chelates. *Journal of Dairy Science*, 95(8), pp.4568-4577. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5404>
- Nocek, J.E., Socha, M.T. and Tomlinson, D.J., 2006. The effect of trace mineral fortification level and source on performance of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 89(7), pp.2679-2693. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72344-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72344-X)
- Ogilvie, L., Van Winters, B., Mion, B., King, K., Spricigo, J.F.W., Karrow, N.A. and Ribeiro, E.S., 2023. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in the diet of prepartum cows on quality of colostrum and immunity of newborn calves. *Journal of Dairy Science*, 106(5), pp.3493-3508. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21913>
- Osorio, J.S., Trevisi, E., Li, C., Drackley, J.K., Socha, M.T. and Loo, J.J., 2016. Supplementing Zn, Mn, and Cu from amino acid complexes and Co from cobalt glucoheptonate during the periparturition period benefits postpartal cow performance and blood neutrophil function. *Journal of Dairy Science*, 99(3), pp.1868-1883. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10040>
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D. and Moher, D., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, pp.372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pomport, P. H., Warren, H.E. and Taylor-Pickard, J., 2021. Effect of total replacement of inorganic with organic sources of key trace minerals on performance and health of high producing dairy cows. *Journal of Applied Animal Nutrition*, 9(1), pp.23-30. <https://doi.org/10.3920/JAAN2020.0.018>
- Rabiee, A.R., Lean, I.J., Stevenson, M.A. and Socha, M.T., 2010. Effects of feeding organic trace minerals on milk production and reproductive performance in lactating dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 93(9), pp.4239-4251. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3058>
- Roshanzamir, H., Rezaei, J. and Fazaeli, H., 2020. Colostrum and milk performance, and blood immunity indices and minerals of Holstein cows receiving organic Mn, Zn and Cu sources. *Animal Nutrition*, 6, pp.61-68. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.08.003>
- Spears, J.W., 2003. Trace mineral bioavailability in ruminants. *The Journal of Nutrition*, 133(5), pp.1506S-1509S. <https://doi.org/10.1093/jn/133.5.1506S>
- Spears, J.W. and Weiss, W.P., 2008. Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *The Veterinary Journal*, 176(1), pp.70-76. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.015>
- Viechtbauer, W., 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), pp.1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
- Yasui, T., Ehrhardt, R.M., Bowman, G.R., Vázquez-Añón, M., Richards, J.D., Atwell, C.A. and Overton, T.R., 2019. Effects of trace mineral amount and source on aspects of oxidative metabolism and responses to intramammary lipopolysaccharide challenge in midlactation dairy cows. *Animal*, 13(5), pp.1000-1008.

<https://doi.org/10.1017/S1751731118002525>

Zhao, X.J., Li, Z.P., Wang, J.H., Xing, X.M., Wang, Z.Y., Wang, L. and Wang, Z.H., 2015. Effects of chelated Zn/Cu/Mn on redox

status, immune responses and hoof health in lactating Holstein cows. *Journal of Veterinary Science*, 16(4), pp.439-446. <http://dx.doi.org/10.4142/jvs.2015.16.4.439>

Este artículo fue publicado en la revista Ciencia Latina.

4. Minerales en plasma, producción y calidad de leche caprina utilizando diferente fuente de cobre y zinc

Plasma minerals, goat milk production, and quality using different sources of copper and zinc.

Noé Galindo-Dorantes¹, Maximino Huerta-Bravo¹, José Orlando Jiménez Paez².

*¹Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Estado de México. C.P 56230. Email: galindodn@gmail.com, maximino_h@hotmail.com**

²Adiseo de México



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,
Volumen 9, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5

MINERALES EN PLASMA, PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LECHE CAPRINA UTILIZANDO DIFERENTE FUENTE DE COBRE Y ZINC

**PLASMA MINERALS, PRODUCTION AND QUALITY OF
GOAT MILK USING DIFFERENT SOURCES OF COPPER
AND ZINC**

Noé Galindo Dorantes

Universidad Autónoma Chapingo, México

Maximino Huerta Bravo

Universidad Autónoma Chapingo, México

Agustín Ruíz Flores

Universidad Autónoma Chapingo, México

José Orlando Jiménez Paez

Universidad Autónoma Chapingo, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20106**Minerales en plasma, producción y calidad de leche caprina utilizando diferente fuente de cobre y zinc****Noé Galindo Dorantes¹**galindodn@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-2559-6141>

Universidad Autónoma Chapingo, México

Maximino Huerta Bravomaximino_h@hotmail.com<http://orcid.org/0000-0002-9150-8971>

Universidad Autónoma Chapingo, México

Agustín Ruíz Floresaruizf@chapingo.mx<http://orcid.org/0000-0001-8267-2107>

Universidad Autónoma Chapingo, México

José Orlando Jiménez Paezjimpaorl9113@gmail.com<http://orcid.org/0000-0002-2187-6381>

Synbios, México

RESUMEN

La nutrición mineral adecuada del ganado mejora su productividad, para esto existen diversas opciones comerciales. Este estudio evaluó el efecto de fuentes hidroxiladas y sulfatos de cobre (Cu) y zinc (Zn) en la producción, calidad de leche y biodisponibilidad mineral en cabras. Se utilizaron 30 cabras multiparas Alpina, Toggemburg y Saanen, distribuidas aleatoriamente en dos tratamientos: 1) Cu y Zn de sulfatos y 2) Cu y Zn hidroxilados. Se formuló una dieta integral siguiendo las recomendaciones del NRC (2007), suministrándose de 30 d parto hasta 30 d posparto, dos veces día⁻¹. Se tomaron muestras de sangre antes y después de proporcionar los tratamientos experimentales por punción de la vena yugular. Los minerales se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica. El ordeño fue manual y las muestras de leche, recolectadas semanalmente en viales de 200 ml, se procesaron con un MilkoScan™ FT 120. Las células somáticas (SCC) se cuantificaron usando el kit Somaticell SCC®, y los datos se analizaron bajo un diseño completamente al azar en arreglo de parcelas divididas. Los resultados mostraron que la concentración de Cu fue menor ($P < 0.001$) y deficiente en cabras que recibieron minerales hidroxilados. No hubo diferencias en producción, o composición porcentual de proteína, sólidos totales, sólidos no grasos o SCC de la leche. Sin embargo, la grasa en leche fue mayor ($P \leq 0.02$) en cabras que recibieron minerales hidroxilados únicamente en el primer y tercer periodo de muestreo. Ambas fuentes de minerales se pueden utilizar sin afectar la productividad y la concentración mineral en plasma sanguíneo de cabras, excepto para el caso del cobre.

Palabras clave: minerales hidroxilados, biodisponibilidad, minerales traza, SCC, cabras

¹ Autor principal.

Correspondencia: galindodn@gmail.com

Plasma minerals, production and quality of goat milk using different sources of copper and zinc

ABSTRACT

Adequate mineral nutrition in livestock enhances its productivity, and diverse commercial options are available to achieve this. This study evaluated the effect of hydroxylated and sulfate sources of copper (Cu) and zinc (Zn) on milk production, milk quality, and mineral bioavailability in goats. Thirty multiparous Alpine, Toggenburg, and Saanen goats were randomly assigned to two treatments: 1) sulfate Cu and Zn, and 2) hydroxylated Cu and Zn. A complete diet was formulated according to the NRC (2007) recommendations. It was provided twice daily from 30 d before until 30 d after parturition. Blood samples were taken, before and after providing the experimental treatments, by jugular vein puncture. The minerals were determined by atomic absorption spectrophotometry. Milking was by hand and milk samples, collected weekly in 200 ml vials, were processed with a MilkoScan™ FT 120. Somatic cells (SCC) were quantified using the Somaticell SCC® kit, and the data were analyzed following a completely randomized design in a split-plot arrangement. The results showed that Cu concentration was lower ($P<0.001$) in goats receiving hydroxylated minerals. There were no differences in milk yield, protein, total solids, non-fat solids, or SCC. However, milk fat was higher ($P\leq 0.02$) in goats that received hydroxylated minerals only during the first and third period. Both mineral sources can be used without affecting productivity and mineral bioavailability in goats, except copper in blood serum.

Key words: hydroxylated minerals, bioavailability, trace minerals, SCC, goats

Artículo recibido 25 agosto 2025

Aceptado para publicación: 25 setiembre 2025



INTRODUCCIÓN

La inclusión de microminerales o minerales traza (MT) esenciales en las dietas para animales es necesaria por múltiples razones (Caldera et al., 2015; Byrne & Murphy, 2022): 1) Un gran número de reacciones bioquímicas requieren MT para su adecuado funcionamiento (Caldera et al., 2015), 2) Juegan un papel importante en el cuerpo como cofactores de enzimas involucradas en el control de radicales libres en el cuerpo y son vitales para la capacidad antioxidante, especialmente el estrés oxidativo y el adecuado funcionamiento del sistema inmune (Overton & Yasui, 2014 y Goff, 2018); y 3) están involucrados en funciones estructurales, fisiológicas, catalíticas y regulatorias (Byrne & Murphy, 2022). Cotidianamente las fuentes utilizadas para adicionar MT a las raciones de los animales son los sulfatos, también conocidos como minerales inorgánicos que son altamente solubles en medios acuosos (van Kuijk et al., 2022). La suplementación de MT inorgánicos ha sido efectiva en prevenir y corregir las deficiencias de minerales en el ganado (Spears, 2013), en los sulfatos un ion mineral está unido a un ion sulfato mediante un enlace iónico (Wagner et al., 2016). Por otro lado, los minerales orgánicos o quelatados son moléculas donde un ion mineral está covalentemente unido a un carbohidrato, proteína o una molécula de aminoácido (Wagner et al., 2016). Los minerales hidroxilados se manufacturan utilizando un proceso patentado donde se hace reaccionar formas altamente purificadas de los minerales con agua, como fuente de grupos hidroxilo y ácido clorhídrico, como fuente de cloruro (Wagner et al., 2016). Durante el proceso, se forman cristales de hidroxiclорuro que mantienen al ion mineral unido mediante enlaces covalentes a grupos hidroxilo y cloruros (Wagner et al., 2016). Muchas de las interacciones entre los MT tienen lugar en el ambiente ruminal, una ventaja de los minerales hidroxilados es su capacidad de sobrepasar el rumen, minimizando las interacciones que normalmente ocurren ahí (Spears, 2013).

Las fuentes de minerales que proporcionen una mayor biodisponibilidad de los elementos podrían ayudar a reducir la cantidad de minerales adicionados a las raciones con los efectos inmediatos de reducir los costos de las raciones y disminuir la contaminación ambiental que se genera por la excreción de los minerales no aprovechados por el ganado (Wagner et al., 2016). Se han realizado algunos trabajos, particularmente en ganado lechero (Uchida et al., 2001; Kincaid & Socha, 2004; Formigoni et al., 2011; Yasui et al., 2014; Pomport et al., 2021) donde evaluaron la producción y calidad de leche utilizando



MT orgánicos o hidroxilados comparados con sulfatos, los resultados son variables, estos estudios se enfocaron principalmente en cobre, zinc y manganeso. Por otro lado, los trabajos para evaluar la biodisponibilidad y el efecto de los minerales hidroxilados en la producción de leche de cabras son escasos. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción y la calidad de leche, así como la concentración mineral en plasma sanguíneo de cabras productoras de leche cuando se utilizan fuentes de cobre y zinc hidroxilados en comparación con sulfatos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Módulo de Ovinos y Caprinos de la Granja Experimental del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo en el municipio de Texcoco, estado de México.

Animales y dietas experimentales

Se utilizaron 30 cabras multíparas Alpina, Toggemburg y Saanen. Aproximadamente 30 d antes de la fecha de parto se asignaron aleatoriamente a uno de dos tratamientos: 1) utilización de sulfatos como fuente de Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y Zn (ZnSO_4) y 2) utilización de hidroxicloruros como fuente de cobre ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) y Zn ($\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{O})$), conocidos como hidroximinerales. Las cabras se alimentaron a libre acceso con una dieta integral (Cuadro 1), la dieta y la premezcla mineral (Cuadro 2) se formularon de acuerdo con las recomendaciones del NRC (2007). El periodo experimental consistió en 30 d antes de la fecha probable de parto hasta 30 d después de éste. Los primeros 15 d las cabras se alimentaron a base de ensilado de maíz más 1 kg de la dieta experimental, el resto del periodo se alimentaron a libre acceso con los tratamientos correspondientes, el alimento se les ofreció a las 08:00 y 16:00 h.

Cuadro 1
Composición de la dieta experimental

Ingrediente	Inclusión (%)
Grano de sorgo	57.0
Pasta de Soya	2.2
Gluten de Maíz	6.0
Alfalfa Achicalada	9.0
Paja de Avena	23.3



Premezcla mineral ^a	2.0
Sal común	0.5
Contenido Nutricional	
EM (Mcal/kg MS)	2.6
PC (%)	14
PCNDR (%)	7
FDN (%)	28
Proporción Forraje:Concentrado	
Forraje	32.4
Concentrado	67.6

^a la composición de la premezcla mineral se muestra en el Cuadro 2

Cuadro 2
Composición de la premezcla mineral

Ingrediente	Inclusión en la premezcla (%)	
	Sulfatos	Hidroxilados
Carbonato de calcio	22.56	22.56
Ortofosfato de calcio	29.17	29.17
Oxido de magnesio	16.67	16.67
Sulfato de manganeso	0.35	0.35
Sulfato de cobre	0.40	0
Hidrocloruro de cobre	0	0.17
EDDI	0.00625	0.00625
Carbonato de cobalto	0.002	0.002
Sulfato de zinc	0.71	0
Hidroxiclururo de zinc	0	0.42
Selenito de sodio	0.00667	0.00667
Sal común	30.12	30.64



La premezcla mineral aportó: Ca, 0.18%; P, 0.14%; Mg, 0.18%; Mn, 20 ppm; Cu, 20 ppm; I, 1 ppm; Co, 0.20 ppm; Zn, 50 ppm y Se, 0.6 ppm.

Toma y procesamiento de muestras

Minerales. Para determinar los minerales en el plasma sanguíneo se tomaron muestras mediante punción de la vena yugular en tubos vacutainer de 10 mL, se mantuvieron en refrigeración para su transporte al laboratorio donde se centrifugaron a 2500 rpm por 15 minutos para obtener el plasma, el cual se congeló hasta su posterior análisis. La primera muestra se tomó antes de iniciar el periodo experimental, después del parto se tomaron tres muestras a intervalos de 10 d.

La determinación de minerales se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo AAnalyst 700, la determinación de fósforo se realizó por colorimetría en un espectrofotómetro Perkin Elmer UV/VIS modelo Lambda 2, siguiendo la metodología descrita por Fick et al. (1979). Se determinaron las concentraciones de cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y fósforo (P).

Leche. Las cabras se ordeñaron manualmente una vez por semana a las 07:00 h, el primer ordeño se realizó tres días después del parto. se registró la producción y se tomaron muestras de leche de aproximadamente 200 mL y se colocaron en un vial para transportarlas al laboratorio para su análisis. Se utilizó un MilkoScan™ FT 120 para determinar los porcentajes de proteína, grasa, sólidos totales, sólidos no grasos y lactosa.

La determinación de células somáticas se realizó por medio del kit Somaticell SCC® mediante el siguiente procedimiento: a) agregar 2 mL de reactivo al tubo, b) agregar 2 mL de leche, c) agitar la mezcla en diez ocasiones volteando el tubo de arriba abajo, d) tapar el tubo e invertirlo y dejar escurrir por 20 segundos, utilizar un cronómetro, e) regresar el tubo a su posición normal y proceder a realizar la lectura.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado en arreglo de parcelas divididas, la parcela grande fue el tratamiento y la parcela chica el periodo de muestreo. El modelo estadístico utilizado para las diferentes variables analizadas fue:

$$y_{ijk} = \mu + T_i + \epsilon_{ij} + P_k + TP_{ik} + \epsilon_{ijk}$$



y_{ijk} = variable de respuesta correspondiente al i-ésimo tratamiento, j-ésima repetición en el k-ésimo periodo,

μ = media general,

T_i = efecto de i-ésimo tratamiento,

ϵ_{ij} = error experimental,

P_k = efecto del k-ésimo periodo,

TP_{ik} = efecto de la interacción tratamiento por periodo,

ϵ_{ijk} = error de subparcela

La comparación de medias se realizó mediante la prueba de TUKEY con un nivel de significancia de 0.05 mediante el programa estadístico SAS® Studio, (2025) utilizando el procedimiento GLM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fuente de Cu y Zn no afectó ($P>0.403$) las concentraciones de Ca, Na, K, P, Mg, Zn, Fe y Mn en plasma sanguíneo de cabras lecheras (Cuadro 3). La concentración de cobre fue 47.83% más baja ($P<0.001$) en las cabras alimentadas con cobre hidroxilado con respecto a las alimentadas con sulfatos. Con excepción de Fe, las concentraciones plasmáticas de los minerales estuvieron por debajo de los valores considerados normales (Muñoz et al., 2015). Lo anterior puede ser por un deficiente manejo nutricional del rebaño. Hay pocos trabajos que evalúan el efecto de suministrar minerales hidroxilados (HTM) y su relación con la concentración de minerales en el plasma de cabras lecheras. En la búsqueda de evitar las interacciones que existen en el ambiente ruminal con las fuentes de minerales con base en sulfatos se han diseñado minerales orgánicos y HTM, ambos tienen la capacidad de sobrepasar las condiciones higroscópicas del rumen y disolverse en el ambiente ácido del abomaso, mejorando así su absorción por parte de los rumiantes (Spears, 2013). Sin embargo, se han observado resultados contradictorios. En este estudio, nuestros resultados contrastan con los reportados por Farrag et al. (2021) quienes no observaron diferencias en las concentraciones de cobre de cabras alimentadas con fuentes orgánicas o inorgánicas en las diferentes etapas de preñez. Muñoz et al. (2015), reportaron un incremento en la concentración sérica de cobre en cabras lecheras cuando suministraron 5 mg de alambre de óxido de cobre, mientras que la concentración de zinc disminuyó. Por otro lado, Vanvalin et al. (2019)



reportaron que novillos suplementados con 10 mg Cu/kg MS tuvieron mayor concentración de cobre en hígado que los suplementados con 5 mg Cu/kg MS o los del tratamiento control. Sin embargo, al igual que Caramalac et al. (2017) y Spears et al. (2004) no encontraron diferencias en la concentración final de cobre en hígado y plasma de novillos que recibieron Cu de fuentes inorgánicas o hidroxiladas. Por otro lado, Henderson et al. (2024) observaron que novillos suplementados con sulfato de cobre tuvieron mayor concentración de Cu en plasma que aquellos que recibieron glicinato de cobre. Estos mismos autores reportaron que no hubo diferencias en la concentración de Cu en el hígado de novillos cuando fueron alimentados con sulfatos vs glicinatos. Shaeffer et al. (2017) observaron una mayor absorción y retención de Zn en novillos alimentados con hidroxiclورو de Zn en comparación con los alimentados con sulfato de zinc, así mismo, registraron que el día 40 del experimento la concentración de Zn en plasma fue mayor en los novillos que recibieron hidroxiclورو de Zn. En contraste, Caramalac et al. (2017) no observaron diferencias en la concentración de Zn en plasma de novillos alimentados con fuentes inorgánicas o hidroxiladas.

Cuadro 3

Valores normales de minerales (mg L^{-1}), medias de mínimos cuadrados (Sulfatos e Hidroxilados), error estándar de la media (EEM) y nivel de significancia para los efectos de fuente (Trat), periodo (Per) y su interacción en la concentración de minerales en plasma sanguíneo de cabras lecheras.

Variable	Tratamiento (Trat)				Comparación		
	Normal	Sulfatos	Hidroxilados	EEM ^a	Trat	Per ^b	Trat x Per
Ca	80-110	30.81	32.68	1.264	0.615	<0.001	0.336
Na	3200-3500	1808.20	1796.66	40.93	0.531	0.211	0.054
K	150-200	123.70	128.52	3.504	0.690	0.0006	0.412
P	40-60	23.14	22.06	1.125	0.403	<0.001	0.806
Mg	18-35	24.07	24.49	0.626	0.797	0.063	0.280
Cu	0.8-1.5	0.92	0.48	0.031	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	1.1-2.5	0.61	0.62	0.015	0.921	0.014	0.022
Fe	1.0-2.5	2.20	2.19	0.057	0.104	<0.001	0.286
Mn		0.67	0.66	0.014	0.688	0.001	0.811

^aEEM = Error Estándar de la Media

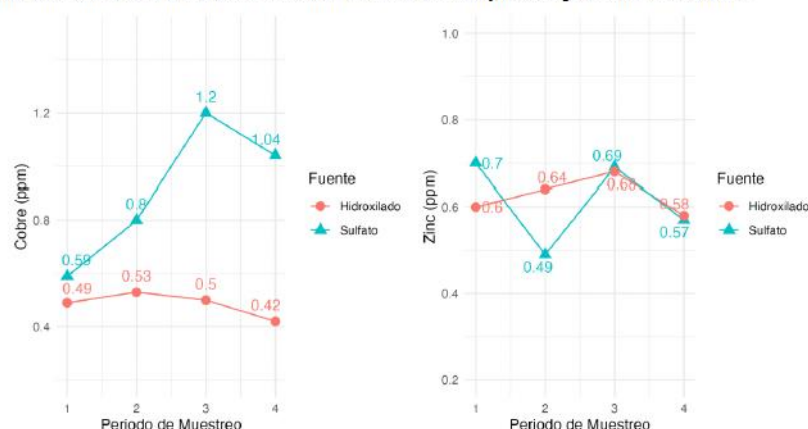
^bPer = Periodo de muestreo



Trat x Per = Interacción Tratamiento x Periodo de muestreo

Se observó una interacción significativa (Cuadro 3) entre tratamiento y periodo de muestreo para la concentración plasmática de cobre, zinc y sodio ($P \leq 0.054$). En cobre, la diferencia se presenta a partir del periodo dos al cuatro, en zinc la diferencia se observa en el periodo dos (Figura 1). La concentración de Zn y Cu en plasma de novillos en finalización fue similar cuando se suplementaron las dietas con 90 mg/kg MS de Zn y 17.5 mg/kg MS de Cu utilizando fuentes hidroxiladas y sulfatos (Caldera et al., 2017).

Figura 1. Concentración de cobre y zinc en plasma (ppm) de cabras alimentadas con diferente fuente de estos minerales durante la lactancia a través de los diferentes periodos de muestreo



No se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) en la producción de leche (Cuadro 4) al utilizar diferente fuente de cobre y zinc en la dieta de cabras lecheras. Las cabras que recibieron dietas suplementadas con minerales traza hidroxilados tuvieron una producción mayor en comparación al tratamiento control, sin ser estadísticamente significativa. La fuente de cobre y zinc no tuvo efecto ($P > 0.05$) sobre proteína, lactosa, sólidos no grasos y sólidos totales (Cuadro 4) en la leche de cabra. El contenido de grasa fue mayor ($P \leq 0.02$) en el grupo de cabras que recibieron minerales traza hidroxilados en el primer y tercer periodo únicamente, estos resultados contrastan con los de Salama et al. (2003) quienes encontraron un menor contenido de grasa en leche de cabras que recibieron una dieta con Zn orgánico en comparación con la de cabras que recibieron la dieta con una fuente inorgánica de Zn. Así



mismo, se presentó una interacción ($P=0.01$) del tratamiento a través del tiempo para el contenido de grasa en leche (Figura 2). El contenido de células somáticas no se afectó ($P>0.05$) por la fuente de cobre y zinc utilizada en las dietas experimentales proporcionadas a las cabras (Cuadro 4). Son pocos los trabajos que se han realizado para evaluar el efecto de suministrar HTM en la producción y calidad de leche de cabras. En el estudio realizado por Salama et al. (2003) donde suplementaron las dietas de cabras con Zn-metionina vs óxido de Zinc durante 20 semanas, no se observaron diferencias en la producción de leche. Por otro lado, Yasui et al. (2014) en vacas lecheras en donde suplementaron Cu, Zn y Mn de fuentes inorgánicas e hidroxiladas no observaron diferencias en producción de leche ni en sus componentes (grasa, proteína y lactosa). En estudios realizados por Uchida et al. (2001); Kincaid & Socha (2004); Formigoni et al. (2011) y Osorio et al. (2016) no se observaron diferencias significativas en producción de leche en vacas cuando se suplementaron Cu, Zn y Mn de fuentes inorgánicas frente a orgánicas. Por otro lado, Pomport et al. (2021) observaron un incremento en la producción de leche de vacas alimentadas con dietas suplementadas con minerales traza orgánicos en comparación con inorgánicos. En contraste, Mion et al. (2022) reportaron una menor producción de leche en vacas de primer parto que recibieron minerales traza de fuentes orgánicas en comparación con las que recibieron estos minerales de fuentes inorgánicas.

Cuadro 4

Efecto de la fuente de cobre y zinc sobre producción de leche y sus características en cabras lecheras

Variable	Tratamiento (Trat)			Comparación		
	Sulfatos	Hidroxilados	EEM	Trat	Per	Trat x Per
Leche, kg d ⁻¹	0.78	1.01	0.07	0.31	0.68	0.71
Grasa, %	2.97	4.05	0.27	0.02	<0.05	0.01
Proteína, %	3.15	3.17	0.07	0.93	0.34	0.79
Lactosa, %	4.20	3.96	0.17	0.25	<0.05	0.34
SNG, %	8.27	8.20	0.14	0.76	<0.05	0.93
ST, %	11.20	12.28	0.30	0.07	0.11	0.06
CCS	652.19	874.83	69.42	0.29	0.98	0.88

SNG = Sólidos no grasos

ST = Sólidos totales



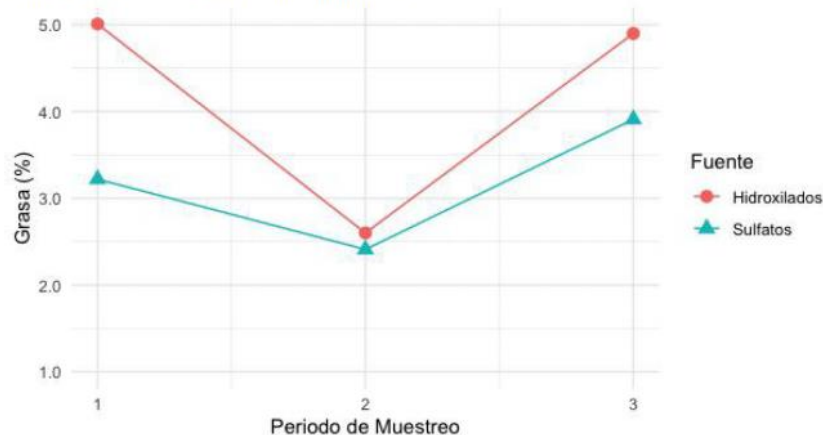
EEM = Error estándar de la media

CCS = Conteo de Células Somáticas (10^3 células/mL)

La concentración de grasa fue mayor durante todo el periodo experimental en las cabras que recibieron la premezcla mineral con cobre y zinc hidroxilado, en el segundo muestreo hubo una caída en el contenido de grasa en leche de ambos tratamientos (Figura 2). Estos resultados coinciden con los observados por Formigoni et al. (2011) quienes reportaron un incremento en la producción de grasa en los primeros 150 d de lactación en vacas que recibieron minerales orgánicos comparadas con las que recibieron inorgánicos. Sin embargo, Uchida et al. (2001) no observaron efectos en el contenido de grasa en leche de vacas que recibieron minerales traza orgánicos en comparación con las que los recibieron de fuentes inorgánicas. Por otro lado, Salama et al. (2003) observaron una disminución ($P=0.07$) de 8.8% en el contenido de grasa en leche de cabras suplementadas con 1 g/d de Zinc-metionina. Resultados similares fueron observados por Song et al. (2024) quienes registraron una disminución en el contenido de grasa en leche de cabras cuando reemplazaron minerales traza de fuentes inorgánicas por orgánicas. En diversos estudios realizados en vacas lecheras (Uchida et al., 2001; Kincaid & Socha, 2004; Formigoni et al., 2011 y Osorio et al., 2016) y en cabras (Salama et al., 2003) no se observaron diferencias en el conteo de células somáticas al suplementar dietas con minerales traza orgánicos en comparación con los inorgánicos, estos resultados coinciden con los observados en este estudio.



Figura 2. Concentración de grasa en leche de cabras alimentadas con diferente fuente de cobre y zinc en la dieta a través de los periodos de muestreo.



CONCLUSIONES

La apropiada nutrición mineral de los animales de producción es de suma importancia para que puedan expresar su potencial genético. En rumiantes, debido a sus particularidades en su fisiología digestiva, es importante garantizar el suministro adecuado de minerales traza. Alimentar cabras lecheras con minerales hidroxilados en sustitución de sulfatos, no afectó la concentración en plasma de los principales elementos limitantes de la producción, excepto cobre, que presentó una menor concentración en las cabras que recibieron minerales hidroxilados. La producción de leche, contenido de proteína, lactosa, sólidos no grasos y SCC no se afectó por la suplementación de minerales hidroxilados. Cuando las cabras se alimentaron con minerales hidroxilados el contenido de grasa se mejoró únicamente en el primer y tercer periodo y los sólidos totales mostraron una tendencia a incrementarse. En futuras investigaciones se podría considerar evaluar la biodisponibilidad a través de medir la actividad de las principales enzimas donde Cu y Zn juegan un papel importante.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Byrne, L., & Murphy, R. A. (2022). Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/ani12151981>
- Caldera, E., Engle, T. E., Wagner, J. J., Archibeque, S. L., & Rollin, B. (2015). *Dissertation examining in vitro and in vivo characteristics of intellibond and sulfate forms of copper, zinc, and manganese Submitted by. Colorado State University.*
- Caldera, E., Wagner, J. J., Sellins, K., Laudert, S. B., Spears, J. W., Archibeque, S. L., & Engle, T. E. (2017). Effects of supplemental zinc, copper, and manganese concentration and source on performance and carcass characteristics of feedlot steers. *Professional Animal Scientist*, 33(1), 63–72. <https://doi.org/10.15232/pas.2016-01531>
- Caramalac, L. S., Saran Netto, A., Martins, P. G. M. A., Moriel, P., Ranches, J., Fernandes, H. J., & Arthington, J. D. (2017). Effects of hydroxychloride sources of copper, zinc, and manganese on measures of supplement intake, mineral status, and pre- and postweaning performance of beef calves. *Journal of Animal Science*, 95(4), 1739–1750. <https://doi.org/10.2527/jas2016.0934>
- Farrag, B., El-Hamid, I. S. A., El-Rayes, M. A. H., Shedeed, H. A., & Younis, F. E. (2021). Effect of Some Organic and Mineral Salts Supplementation on Hematological, Biochemical, Immunological Constituents and Reproduction in Hassani Goats under Arid Conditions. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 9(12), 2036–2046. <https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2021/9.12.2036.2046>
- Fick, K. A., McDowell, L. R., Miles, P. H., Wilkinson, N. S., Funk, J. D., Conrad, J. H., & Valdivia, R. (1979). *Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales*. University of Florida.
- Formigoni, A., Fustini, M., Archetti, L., Emanuele, S., Sniffen, C., & Biagi, G. (2011). Effects of an organic source of copper, manganese and zinc on dairy cattle productive performance, health status and fertility. *Animal Feed Science and Technology*, 164(3–4), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.01.010>



- Goff, J. P. (2018). Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid–base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 2763–2813. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13112>
- Henderson, J. A., Niedermayer-Conway, E. K., & Hansen, S. L. (2024). Determination of relative bioavailability of copper from copper glycinate in growing beef steers. *Translational Animal Science*, 8. <https://doi.org/10.1093/tas/txae105>
- Kincaid, R. L., & Socha, M. T. (2004). Inorganic Versus Complexed Trace Mineral Supplements on Performance of Dairy Cows. *Professional Animal Scientist*, 20(1), 66–73. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31274-2](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31274-2)
- Mion, B., Van Winters, B., King, K., Spricigo, J. F. W., Ogilvie, L., Guan, L., DeVries, T. J., McBride, B. W., LeBlanc, S. J., Steele, M. A., & Ribeiro, E. S. (2022). Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(8), 6693–6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>
- Muñoz, G. J. C., Huerta, B. M., Ramírez, V. R., & González, A. M. J. (2015). Estado mineral y suplemento con alambre de óxido de cobre en cabras de San José Teacalco, Tlaxcala. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(5), 203–210. www.ujat.mx/era
- NRC. (2007). *Nutrients Requirements of Small Ruminants*. National Academies Press.
- Osorio, J. S., Trevisi, E., Li, C., Drackley, J. K., Socha, M. T., & Looor, J. J. (2016). Supplementing Zn, Mn, and Cu from amino acid complexes and Co from cobalt glucoheptonate during the peripartal period benefits postpartal cow performance and blood neutrophil function. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 1868–1883. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10040>
- Overton, T. R., & Yasui, T. (2014). Practical applications of trace minerals for dairy cattle. *Journal of Animal Science*, 92(2), 416–426. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7145>



- Pomport, P. H., Warren, H. E., & Taylor-Pickard, J. (2021). Effect of total replacement of inorganic with organic sources of key trace minerals on performance and health of high producing dairy cows. *Journal of Applied Animal Nutrition*, 9(1), 23–30. <https://doi.org/10.3920/JAAN2020.0018>
- Salama, A. A. K., Caja, G., Albanell, E., Such, X., Casals, R., & Plaixats, J. (2003). Effects of dietary supplements of zinc-methionine on milk production, udder health and zinc metabolism in dairy goats. *Journal of Dairy Research*, 70(1), 9–17. <https://doi.org/10.1017/S0022029902005708>
- Shaeffer, G. L., Lloyd, K. E., & Spears, J. W. (2017). Bioavailability of zinc hydroxychloride relative to zinc sulfate in growing cattle fed a corn-cottonseed hull-based diet. *Animal Feed Science and Technology*, 232, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.07.013>
- Song, Y., Weng, Y., Liu, S., Usman, M., Loo, J. J., Lin, G., Hu, Q., Luo, J., & Wang, P. (2024). Effects of reduced levels of organic trace minerals in proteinate forms and selenium yeast in the mineral mix on lactation performance, milk fatty acid composition, nutrient digestibility, and antioxidant status in dairy goats. *Journal of Animal Science*, 102. <https://doi.org/10.1093/jas/skae187>
- Spears, J. W. (2013). Advances in Ruminant Trace Mineral Nutrition. *Cornell Nutrition Conference*, 22–24.
- Spears, J. W., Kegley, E. B., & Mullis, L. A. (2004). Bioavailability of copper from tribasic copper chloride and copper sulfate in growing cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 116(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.06.002>
- Uchida, K., Mandevu, P., Ballard, C. S., Sniffen, C. J., Carter, M. P., & Miner, W. H. (2001). Effect of feeding a combination of zinc, manganese and copper amino acid complexes, and cobalt glucoheptonate on performance of early lactation high producing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 93(3–4), 193–203.
- van Kuijk, S., Swiegers, P., & Han, Y. (2022). Hydroxychloride trace minerals improve apparent total tract nutrient digestibility in Bonsmara beef cattle. *Livestock Science*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104820>



- Vanvalin, K. R., Genther-Schroeder, O. N., Laudert, S. B., & Hansen, S. L. (2019). Relative bioavailability of organic and hydroxy copper sources in growing steers fed a high antagonist diet. *Journal of Animal Science*, 97(3), 1375–1383. <https://doi.org/10.1093/jas/sky487>
- Wagner, J. J., Engle, T. E., Caldera, E., Neuhold, K. L., Woerner, D. R., Spears, J. W., Heldt, J. S., & Laudert, S. B. (2016). The effects of zinc hydroxychloride and basic copper chloride on growth performance, carcass characteristics, and liver zinc and copper status at slaughter in yearling feedlot steers. *Professional Animal Scientist*, 32(5), 570–579. <https://doi.org/10.15232/pas.2015-01480>
- Yasui, T., Ryan, C. M., Gilbert, R. O., Perryman, K. R., & Overton, T. R. (2014). Effects of hydroxy trace minerals on oxidative metabolism, cytological endometritis, and performance of transition dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3728–3738. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7331>



5. CONCLUSIONES GENERALES

La utilización de fuentes orgánicas de cobre y zinc en la dieta no afectan el comportamiento productivo y la composición de la leche de vacas Holstein. Asimismo, la utilización de fuentes hidroxiladas de cobre y zinc en la dieta, no afectan el comportamiento productivo de cabras productoras de leche. Sin embargo, la utilización de cobre y zinc hidroxilados mejora la concentración de grasa en leche e incrementan los sólidos totales. No se afectó la concentración de los principales minerales en plasma sanguíneo aunque la concentración de cobre fue menor en cabras que recibieron fuentes hidroxiladas.