

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**Instituto De Ciencias Agrícolas**



**EFFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE MINERALES TRAZA  
INYECTABLES SOBRE VARIABLES FISIOLÓGICAS,  
METABÓLICAS Y DE CRECIMIENTO EN TERNEROS  
HOLSTEIN**

**TESIS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN ANIMAL EN CLIMAS  
CÁLIDOS**

**PRESENTA**

**M.V.Z. REYNA LEONORA LEAL MARTINEZ**






**DIRECTOR**

**DR. JOSÉ ALEJANDRO ROQUE JIMÉNEZ**

La presente tesis titulada “**Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables sobre variables fisiológicas, metabólicas y de crecimiento en terneros Holstein**”, realizada por la **C. Reyna Leonora Leal Martínez**, quien fue dirigida por el **Dr. José Alejandro Roque Jiménez**, siendo aceptada, revisada y aprobada por el Consejo Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestra en Ciencias en Producción Animal en Climas Cálidos**

**COMITÉ PARTICULAR**

Presidente/Director	 _____
	Dr. José Alejandro Roque Jiménez
Sinodal/Asesor	 _____
	Dr. Ulises Macias Cruz
Sinodal/Asesor	 _____
	Dr. Leonel Avendaño Reyes
Sinodal/Asesor	 _____
	Dra. María de los Ángeles López Baca
Sinodal/Asesor	 _____
	Dr. Ricardo Vicente Pérez

**“POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER”**

Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México, marzo de 2026.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California por permitirme realizar mis estudios de maestría y por el apoyo a través del proyecto 200/3733. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca de posgrado otorgada. Al Cuerpo Académico de Fisiología y Genética Animal por aceptarme e incorporarme a su equipo. Cada uno aportó no solo su valioso tiempo, sino también consejos y conocimientos para ayudarme a realizar este trabajo. A Axiota Animal Health, a través del Dr. Marcello Guadagnini. Además, agradezco profundamente el tiempo, el acompañamiento y, sobre todo, la paciencia de mi director de tesis, el Dr. Alejandro Roque, pieza clave para este logro, por brindarme con generosidad sus conocimientos y experiencias en el área científica y por confiar en mí. A la Dra. Marisol López, quien, a través de su experiencia, brindó el consejo justo en momentos oportunos y compartió las charlas más amenas durante mi estadía fuera y dentro del Instituto, más allá de lo científico. Extiendo también mi agradecimiento al Dr. Guillermo “Coco” Mattioli, Belén Ventura, Walter Galván, Mateo y Patricio Anchordoquy, por compartir sus conocimientos y por recibirme como una amiga durante mi estancia en la Universidad Nacional de La Plata.

Agradezco, además, a mis compañeros de estudio, con quienes se logró formar un equipo sólido de “sabendijas”, por esos momentos gratos que pasamos, para hacer más llevadero el tiempo.

Agradezco al ITSON por formarme como Médico Veterinario Zootecnista y por abrirme la puerta para alcanzar esta meta; a todos y cada uno de mis profesores en esa etapa académica, quienes siguen acompañándome, y doblemente a los que se nos adelantaron.

A Paola, por ser buena amiga y por acompañarme en mis aventuras.

Agradezco la vida que Dios me dio y la familia que me regaló; son ellos mi puerto y donde encuentro mi paz. Gracias a mis hermanos por ser siempre motor, alegría, cobijo, ejemplo y sabiduría en mis días, también por regalarme sobrinos. Baltazar y Misael los amo.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Baltazar y María

## ÍNDICE TEMÁTICO

AGRADECIMIENTOS .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
INDICE DE FIGURAS .....	vii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Hipótesis .....	2
1.2. Objetivos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Contexto general de la producción lechera.....	3
2.1.1 Producción lechera en México.....	3
2.1.2 Bovinos productores de leche .....	5
2.1.3. Sistemas de producción de bovinos lecheros .....	6
2.1.4 Factores en la crianza de terneros .....	9
2.2 Minerales en la nutrición de terneros .....	20
2.2.1. Funciones y metabolismo de los minerales.....	21
2.2.2. Minerales traza, clave para el crecimiento y salud.....	22
2.2.3. Zinc .....	22
2.2.4. Selenio .....	24
2.2.5. Cobre .....	26
2.2.6. Manganeso .....	27
2.3. Vías de administración de suplementos minerales.....	28

2.3.1. Suplementación oral .....	29
2.3.2. Suplementación inyectable .....	29
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
3.1. Periodo experimental y lugar de estudio .....	31
3.2. Ética, animales y manejo preexperimental .....	31
3.3 Diseño y manejo experimental .....	33
3.4. Evaluación de las variables de estudio .....	34
3.4.2. Comportamiento productivo.....	34
3.4.2. Variables fisiológicas .....	35
3.4.3. Hemogramas y concentración de analitos .....	35
3.5. Análisis estadístico .....	36
IV. RESULTADOS.....	37
4.1. Comportamiento productivo .....	37
4.2. Variables fisiológicas .....	39
4.3. Perfiles hematológicos .....	46
4.4 Evaluación de metabolitos y electrolitos sanguíneos.....	55
V. DISCUSIÓN .....	61
5.1. Efecto de la suplementación mineral en el crecimiento de terneros .....	61
5.2. Efectos de la suplementación mineral en la respuesta fisiológica.....	63
5.3. Efecto de la suplementación mineral en perfiles químicos en sangre .....	65
VI. CONCLUSIONES .....	68
VII. LITERATURA CITADA .....	69

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Primeros 10 estados productores de leche con estimaciones federales previas al último trimestre de 2025.....	4
<b>Cuadro 2.</b> Composición química promedio del calostro y de la leche con la que los terneros suplementados con dos aplicaciones de mineral traza inyectable y el tratamiento control fueron alimentados durante el periodo de lactancia.....	32
<b>Cuadro 3.</b> Composición química (base % MS) de la dieta sólida utilizada para alimentar a los terneros Holstein suplementados con minerales traza inyectables, durante el período de lactancia.....	33
<b>Cuadro 4.</b> Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables en el crecimiento, la ganancia diaria de peso y el consumo de dieta sólida de terneros Holstein durante el periodo de lactación.....	37
<b>Cuadro 5.</b> Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables en las variables fisiológicas durante tres periodos del día en terneros Holstein durante el periodo de lactación. ....	40
<b>Cuadro 6.</b> Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables en los perfiles hematológicos durante el periodo de lactación de terneros y terneras Holstein.....	47
<b>Cuadro 7.</b> Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre los metabolitos sanguíneos de terneros Holstein durante el periodo de lactación.....	56

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Manejo integral actualmente sugerido para terneros con genotipo lechero durante el periodo de lactancia.....	11
<b>Figura 2.</b> Cambios en el peso vivo de los terneros Holstein por efecto de la suplementación de MI (con y sin) durante el período de lactación .....	38
<b>Figura 3.</b> Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables (con o sin) sobre la presión sistólica de terneros y terneras Holstein durante el periodo de lactación.....	41
<b>Figura 4.</b> Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables (con y sin) sobre la presión diastólica de terneros y terneras Holstein a diferentes horarios del día (AM= Mañana, MD= Medio día; PM= Tarde).....	42
<b>Figura 5.</b> Frecuencia cardíaca en terneros Holstein suplementados con y sin MI a lo largo del día durante el periodo de lactación (AM= Mañana, MD= Medio día, PM= Tarde).....	43
<b>Figura 6.</b> Presión diastólica de terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	44
<b>Figura 7.</b> Frecuencia cardíaca en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	45
<b>Figura 8.</b> Recuento de glóbulos rojos en terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	48
<b>Figura 9.</b> Concentración del volumen corpuscular medio en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	49

<b>Figura 10.</b> Concentración media de hemoglobina corpuscular en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	50
<b>Figura 11.</b> Concentración de hemoglobina corpuscular media en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	51
<b>Figura 12.</b> Concentración del volumen plaquetario medio en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	52
<b>Figura 13.</b> Recuento de glóbulos rojos en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	53
<b>Figura 14.</b> Recuento de hematocritos en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación.....	54
<b>Figura 15.</b> Concentración de glucosa en suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza durante el periodo de lactación.....	57
<b>Figura 16.</b> Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito sodio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación.....	58
<b>Figura 17.</b> Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito potasio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación.....	59

**Figura 18.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito potasio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación..... 60

## RESUMEN

Se utilizaron 18 terneros neonatos Holstein (ocho machos y diez hembras; peso al nacimiento =  $35.24 \pm 1.52$  kg) para evaluar los efectos de sexo y suplementación de minerales traza inyectables (MI; 60 mg de zinc, 10 mg de manganeso, 5 mg de selenio y 15 mg de cobre) sobre el comportamiento productivo, variables fisiológicas, perfiles hematológicos y concentraciones séricas de metabolitos. Los terneros se distribuyeron en un arreglo factorial  $2^2$  bajo un diseño de bloques completamente al azar, en donde el primer factor fue el sexo (S) y el segundo factor el tratamiento (T), por lo que los terneros fueron asignados en las siguientes 4 combinaciones de tratamientos (T): machos sin (1) o con (2) MI, y hembras sin (3) o con (4) MI. La interacción día  $\times$  MI impactó el peso vivo predestete, siendo mayor ( $P < 0.05$ ) en terneros con MI solamente en los últimos 10 días de lactancia, con ninguna diferencia en los primeros 50 días. Además, los terneros con MI aumentaron ( $P < 0.01$ ) el consumo de dieta sólida y la ganancia de peso. La frecuencia y sus ciclos cardíacos fueron afectados ( $P < 0.01$ ), presentaron niveles más altos que los de los terneros control en días y momentos específicos. La suplementación con MI mostró una tendencia a elevar la concentración de glóbulos rojos en hembras ( $P = 0.06$ ), mientras que los terneros sin MI tendieron a incrementar la hemoglobina corpuscular media ( $P = 0.08$ ) y la concentración de hemoglobina corpuscular media ( $P = 0.09$ ). La concentración de glucosa sérica en los machos suplementados con MI fue mayor ( $P = 0.03$ ) que los demás tratamientos. Los terneros suplementados con MI tuvieron mayor concentración de triglicéridos que los terneros no suplementados ( $P = 0.01$ ). En conclusión, la administración de MI en neonatos Holstein mejora el crecimiento predestete manteniendo su salud y bienestar.

**Palabras clave:** zinc, cobre, terneros, lactancia, salud.

## ABSTRACT

Eighteen Holstein neonatal calves (eight males and ten females; birth weight =  $35.24 \pm 1.52$  kg) were used to evaluate the effects of sex and injectable trace mineral supplementation (IM; 60 mg of zinc, 10 mg of manganese, 5 mg of selenium, and 15 mg of copper) on productive performance, physiological variables, hematological profiles, and serum metabolite concentrations. The calves were randomly assigned to a 2<sup>2</sup> factorial arrangement in a completely randomized block design with the following four treatment combinations: males with or without (1) IM and females with or without (3) IM. The day  $\times$  IM interaction affected pre-weaning live weight, with calves receiving IM showing higher weight gains ( $P < 0.05$ ). This effect was observed only in the last 10 days of lactation ( $P < 0.01$ ), with no difference ( $P > 0.05$ ) in the first 50 days. No interaction was observed for pre-weaning productive performance ( $P > 0.05$ ); however, calves supplemented with MI showed increased ( $P < 0.01$ ) solid diet intake, weight gain, and weaning weight. Heart rate and its cycles showed a T  $\times$  S  $\times$  D interaction ( $P < 0.01$ ) in MI-supplemented calves, which exhibited higher levels than control calves on specific days. MI supplementation tended to increase red blood cell concentration in females ( $P = 0.06$ ) during the experimental phase, whereas calves not supplemented with MI tended to have increased mean corpuscular hemoglobin ( $P = 0.08$ ) and mean corpuscular hemoglobin concentration ( $P = 0.09$ ). Regarding blood metabolites, glucose levels in males supplemented with MI were relatively higher during the experimental phase ( $P = 0.03$ ). Similarly, calves supplemented with MI had a higher relative concentration of triglycerides than calves not supplemented with MI ( $P = 0.01$ ). In conclusion, the use of MI in Holstein calves promotes their growth and maintains their health.

**Keywords:** zinc, copper, calves, suckling, health

## I. INTRODUCCIÓN

La lactancia en terneros lecheros se considera uno de los eventos más estresantes durante la vida temprana, lo cual se acentúa con el destete, y representa la combinación de ambas etapas con altos desafíos a nivel fisiológico y de salud (Carlson et al., 2024). Así, la eficiencia productiva en los terneros lecheros ha seguido expuesta críticamente a un desarrollo ineficiente durante el periodo de lactancia, debido a fallos del sistema inmunitario y a retrasos en el crecimiento (Laporta et al., 2025). Diversas investigaciones han señalado que este desarrollo ineficiente se encuentra estrechamente relacionado con el balance nutricional y mineral de la dieta que consume la madre durante el periodo seco (Carlson et al., 2024; Nennich et al., 2010; Palomares, 2022).

Por esta razón, algunos estudios han propuesto que el uso de minerales de traza podría reducir diversos efectos negativos en los terneros durante su fase de rápido crecimiento y alta demanda metabólica (Lim et al., 2024; Roshanzamir et al., 2020). Esta postulación se debe a que investigaciones recientes han concluido que los minerales trazas, como zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn) y selenio (Se), actúan como cofactores enzimáticos vitales para la activación de sistemas antioxidantes y la modulación de la respuesta inmunitaria (Bicalho et al., 2014; Teixeira et al., 2014). Sin embargo, hay estudios que reportan resultados contradictorios sobre el efecto de los minerales en el crecimiento pre-destete (Bicalho et al., 2014; Lim et al., 2024). Mee et al. (2023) concluyeron que la respuesta positiva o negativa sobre el crecimiento, depende de que tan rápido la función inmunitaria y el desarrollo general de los terneros lecheros maduren su sistema inmunitario, el cual depende de la cantidad de minerales de traza que su madre les dona a través de la placenta en el último tercio de gestación. Adicionalmente, la homeostasis de su estado mineral puede verse afectada por el tipo y la vía de absorción de los minerales traza (Van Emon et al., 2020). Asimismo, Black et al. (2017) reportaron que la única manera de utilizar una suplementación mineral con elementos traza que aumente rápidamente el estado mineral en el cuerpo del ternero son los minerales inyectables, ya que pueden actuar más rápidamente que los ofrecidos en la alimentación (Zindove y Chimonyo, 2015).

Cabe mencionar que hasta el momento no se ha podido dilucidar el momento exacto de la administración parenteral de los minerales traza inyectables. Si bien el sistema inmunológico y los cofactores de crecimiento requieren estos minerales, una asimilación rápida podría derivar en toxicidad, lo que puede llevar al ternero a un shock mineral y generar problemas graves, incluso la muerte (Galyean et al., 2022). Nennich et al. (2010) reportaron efectos nulos sobre el crecimiento con una sola aplicación de minerales traza durante el periodo de lactancia. Por su parte, Bordignon et al. (2019) observaron un aumento de la ganancia diaria en terneros Holstein con la aplicación de minerales traza en los periodos de pre- y posdestete. Algunos estudios solo han reportado efectos positivos en el sistema antioxidante por aplicar estos minerales en terneros (Teixeira et al., 2014; Cashman, 2002). Basado en lo anterior, se requieren más estudios para optimizar los protocolos de suplementación y comprender plenamente su impacto en la salud y la productividad de los terneros. Además, comprobar si la suplementación mineral inyectable en dos fases resulta crucial para obtener resultados óptimos

### **1.1. Hipótesis**

La aplicación parental doble de minerales traza (MI; Zn, Cu, Se y Mn) aumenta el crecimiento predestete de terneros Holstein, como resultado de mejorar la actividad metabólica, el estado de salud y el bienestar de estos animales.

### **1.2. Objetivos**

Evaluar el efecto de la administración doble de MI en terneros y terneras Holstein sobre las variables fisiológicas, comportamiento productivo predestete, perfiles hematológicos y concentraciones de metabolitos séricos asociados al metabolismo de energía, proteína y agua.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Contexto general de la producción lechera

#### 2.1.1 Producción lechera en México

El sector lácteo es vital para la economía y la seguridad alimentaria de México, contribuyendo significativamente al empleo, la producción agrícola y la actividad económica en general (Martínez-García et al., 2013). Además, su producción representa una fuente clave de proteína animal, ya que proporciona leche, carne y otros productos lácteos (Moreno Ramos, 2021). La industria también desempeña un papel crucial en el desarrollo rural y la reducción de la pobreza, especialmente en zonas marginadas (Lee-Rangel et al., 2022).

De acuerdo con el reporte para México por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture, USDA), la producción de leche fluida de vaca en el 2024 fue de 13,8 millones de toneladas métricas (MMT), un crecimiento del dos por ciento en comparación con 2023. La producción para 2023 concluyó en 13,6 MMT, un aumento del 3 % respecto a 2022. De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), en el 2023 el 52 por ciento de la producción nacional de leche se destinó a la elaboración de productos lácteos, como queso, mientras que el resto se consumió como leche fluida.

En 2024, México ha alcanzado el 75 % de la producción total proyectada para cada año en septiembre desde 2020, ya que en los 10 estados de mayor producción ha habido condiciones climáticas generalmente favorables. No obstante, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), organismo de estadísticas agropecuarias de México, estimó que el resto de los estados con producción de leche ha tenido una limitación en alcanzar estas mismas cifras debido a la gestión del hato lechero y el decremento continuo de la producción lechera, particularmente por la falta de integración de los pequeños y medianos productores en el ámbito corporativo de tecnificación y homogenización de la producción (Cuadro 1). Por lo que, en el 2023, México requirió importar leche por valor de 30.4 millones de dólares. Los principales orígenes de estas importaciones fueron Estados Unidos, Nueva Zelanda, España,

Francia y los Países Bajos. Ese mismo año, la leche ocupó el puesto 702 entre los productos más importados en México (SADER, 2023).

**Cuadro 1.** Primeros 10 estados productores de leche con estimaciones oficiales antes del último trimestre de 2023.

<b>Lugar</b>	<b>Estado</b>	<b>Producción Enero a Septiembre<sup>1</sup></b>	<b>Producción Estimada (MT)</b>	<b>Porcentaje completado al estimado anualmente</b>
1	Jalisco	2,061,714	2,803,593	74
2	Coahuila	1,155,161	1,535,498	75
3	Durango	1,138,709	1,513,789	75
4	Chihuahua	949,425	1,267,446	75
5	Guanajuato	682,278	910,545	75
6	Veracruz	599,305	808,447	74
7	Chiapas	337,200	464,700	73
8	Puebla	345,222	462,173	75
9	Aguascalientes	328,978	441,301	75
10	Estado de México	317,788	432,769	73
	Resto de los estados	2,013,506	2,699,674	75
	<b>Total</b>	<b>9,929,287</b>	<b>13,339,936</b>	<b>74</b>

<sup>1</sup>Datos INEGI 2023.

En el ámbito internacional, la producción de leche fluida durante el 2024 y el 2025 ha alcanzado las 669.57 MM, un incremento de 0.70% en comparación con el 2023 y 2024 (USDA, 2025). Los principales países productores de leche bovina son India (211.7 MMT), Estados Unidos (102.45 MMT), China (41.63 MMT), Rusia (34.07 MMT) y Brasil (27.99 MMT), lo que representa el 61% de la producción global. La Unión Europea (150.17 MMT) aporta el 22% de la producción mundial, mientras que

específicamente México produce 13.72 MMT que equivale al 2% de la producción y es el noveno lugar en producción. De acuerdo con los pronósticos y predicciones en la producción lechera publicados por la USDA (2025), SADER (2024), y estudios económicos (Gallegos-Daniel et al., 2023; Rogers-Montoya et al., 2024), México incrementará 10.27% su producción para el 2030. Sin embargo, a pesar del escenario prometedor, México requiere mayor investigación en el desarrollo de tecnología pecuaria para que la ganadería lechera logre alcanzar la proyección necesaria en producción de leche, rentabilidad y mejora de medios de vida de los agricultores, productores y consumidores (Vargas-Canales, 2023).

De acuerdo con Ngeno (2024). En países en vías de desarrollo, el suministro de leche se está enfrentando a numerosas limitaciones de producción que le han impedido satisfacer el incremento a largo plazo. Las prácticas tradicionales, los recursos forrajeros, los factores socioeconómicos y la insuficiencia en investigación desempeñan un papel importante en mejorar en la producción lechera (Jafri et al., 2024). Por lo tanto, se han propuesto diversas estrategias vitales para potencializar la producción lechera. Las cuales se engloban en prácticas de sustentabilidad (Shamsuddoha et al., 2023), valoración de residuos (Soumati et al., 2023), gestión nutricional (Kotsampasi et al., 2024), alimentación especializada (Moran, 2005) y evaluación integral ambiental (Neethirajan, 2023), y los sistemas de recría (F Soberon et al., 2012).

### **2.1.2 Bovinos productores de leche**

El ganado bovino lechero ha desempeñado un papel importante en el desarrollo alimenticio de México, en particular después de la colonización española. Su introducción transformó las prácticas agrícolas tradicionales y los patrones de uso del suelo (Lee-Rangel et al., 2022). El ganado requería áreas de pastoreo más extensas en comparación con las cabras y ovejas nativas, lo que provocó cambios en la gestión del paisaje y los sistemas de propiedad. Actualmente, el ganado lechero desempeña un papel importante en la economía y el desarrollo rural de México, eclipsando en algunas áreas de México la producción lechera de pequeños rumiantes. El sector lácteo contribuye sustancialmente al PIB agrícola del país y ofrece oportunidades de

empleo en las zonas rurales. Debido a esto, las explotaciones lecheras a gran escala han modernizado las técnicas de producción, aumentando la producción y la calidad de la leche. Esto ha mejorado la seguridad alimentaria y el potencial de exportación de productos lácteos. Si bien los pequeños rumiantes se adaptan mejor a ciertas regiones áridas y pueden representar una valiosa fuente de ingresos para los pequeños agricultores, el impacto económico de su producción lechera sigue siendo limitado en comparación con la industria bovina lechera establecida. Sin embargo, los sistemas de producción de bovinos lecheros tienen diversas vertientes dentro de su cadena de producción, lo que ha generado sistemas pecuarios más resilientes que otros en México.

### **2.1.3. Sistemas de producción de bovinos lecheros**

La industria láctea mexicana es un componente vital de la economía nacional. Su producción proviene de una combinación diversa de grandes empresas modernas y pequeñas explotaciones familiares. El crecimiento reciente se atribuye a inversiones estratégicas y a la adopción de técnicas agrícolas modernas, que han mejorado tanto la eficiencia como la calidad del producto. Las razas de ganado lechero más comunes se encuentran la Holstein-Friesian, conocida por su alta producción de leche; la Jersey, valorada por su leche con alto contenido de grasa butírica; y la Ayrshire, reconocida por su rusticidad y adaptabilidad (Lee-Rangel et al., 2022). Otras razas, como la Guernsey, la Brown Swiss y la Milking Shorthorn, también se utilizan en diversos sistemas lecheros a nivel mundial, cada una con características específicas adaptadas a diferentes entornos de producción y demandas del mercado.

Los sistemas de producción de leche abarcan diversos enfoques para el manejo y el confinamiento del ganado lechero. Estos sistemas abarcan desde el pastoreo tradicional en pradera hasta las operaciones intensivas de confinamiento. Los sistemas basados en pradera o pastoreo permiten que las vacas pasten en campos abiertos, lo que promueve comportamientos naturales y reduce potencialmente los costos de alimentación. Por el contrario, los sistemas de confinamiento alojan a las vacas en establos o corrales de engorde, proporcionando entornos controlados y una nutrición constante. Algunas granjas emplean un enfoque híbrido, que combina elementos de

ambos sistemas. Cada sistema presenta sus ventajas y desafíos, incluyendo consideraciones sobre el bienestar animal, el impacto ambiental y la eficiencia económica. Factores como el clima, la disponibilidad de terreno y las demandas del mercado influyen en la elección del sistema de producción de leche. Las explotaciones lecheras modernas suelen incorporar tecnología como sistemas de ordeño automatizados y gestión del rebaño basada en datos para optimizar la producción y la salud animal.

Una parte significativa de la producción lechera de México proviene de granjas de gran escala y tecnológicamente avanzadas, concentradas en los estados norteros de Jalisco, Coahuila, Durango y Chihuahua. Estas operaciones, particularmente en la región de La Laguna, que abarca Coahuila y Durango, se caracterizan por ser "granjas lecheras extremadamente modernas" y suelen manejar hatos de 100 o más vacas, algunas incluso de miles. Los estilos de manejo y las condiciones climáticas en esta región son similares a los del suroeste de Estados Unidos, lo que facilita el uso de tecnologías avanzadas importadas.

Estos sistemas intensivos suelen depender del ganado Holstein de alto rendimiento, alimentado con dietas balanceadas y ricas en nutrientes que incluyen ensilado, granos y subproductos de harina. Este enfoque ha permitido a estas granjas alcanzar rendimientos diarios de leche notablemente altos, llegando algunas operaciones del norte a 37 litros por vaca al día. Esto representa un sorprendente 280% más que el rendimiento promedio de los sistemas tradicionales del sur, lo que pone de manifiesto una importante brecha de productividad a nivel nacional. Para abordar esta disparidad y cumplir con los objetivos de producción del gobierno, se ha producido una importante inversión en infraestructura física, como nuevas plantas procesadoras de lácteos y sistemas de ordeño automatizados. Esta inversión está generando una demanda ascendente de tecnología lechera de precisión y genética de élite. Si bien esta rápida adopción tecnológica es crucial para impulsar la producción, requiere una inversión paralela en infraestructura blanda, que incluye la transferencia de conocimientos, la asistencia técnica y las prácticas avanzadas de gestión. La brecha de productividad no solo refleja la falta de equipos, sino también una diferencia

en la gestión y aplicación de dicha tecnología, lo que sugiere una considerable necesidad de consultoría y formación para transformar esta inversión de capital en ganancias de productividad tangibles a largo plazo.

En marcado contraste con las operaciones modernas del norte, el sector lechero mexicano está compuesto predominantemente por unidades tradicionales de pequeña escala. Un estudio de la región de la Frailesca reveló que las unidades de pequeña escala constituyen aproximadamente el 76.7% del total de unidades, mientras que los productores medianos y grandes representan una proporción mucho menor. Estas pequeñas y medianas explotaciones representan el 97% de todas las granjas lecheras del país y constituyen el foco principal de los nuevos programas gubernamentales de subsidios y asistencia técnica.

Estos sistemas tradicionales suelen ser unidades familiares con un uso intensivo de mano de obra y un bajo nivel tecnológico. Se clasifican como sistemas de doble propósito (DP), que generan ingresos tanto de la venta de leche como de la de terneros destetados para carne. La producción se basa típicamente en pasturas, donde las vacas pastan en forrajes naturales. Sin embargo, estos sistemas enfrentan desafíos económicos y ambientales importantes. Una de sus principales vulnerabilidades es el alto costo de los insumos externos, como el alimento comercial, lo que obliga a muchos productores a reducir el tamaño de sus hatos y buscar alternativas más rentables, aunque a menudo menos nutritivas, como los subproductos agrícolas. Estos sistemas también son muy susceptibles a las variaciones estacionales en la disponibilidad de forraje, que se ven agravadas por sequías y otros problemas climáticos. Un estudio de modelado nutricional reveló que la mayoría de las vacas en estos sistemas tropicales presentan déficits energéticos al final de la gestación, lo que limita significativamente la producción de leche y compromete el rendimiento reproductivo. Esto crea un ciclo de vulnerabilidad que se perpetúa: el estrés nutricional reduce la productividad y la salud de los animales, lo que a su vez limita los ingresos de la explotación y, por lo tanto, limita la capacidad de invertir en los suplementos y las tecnologías necesarias para romper el ciclo.

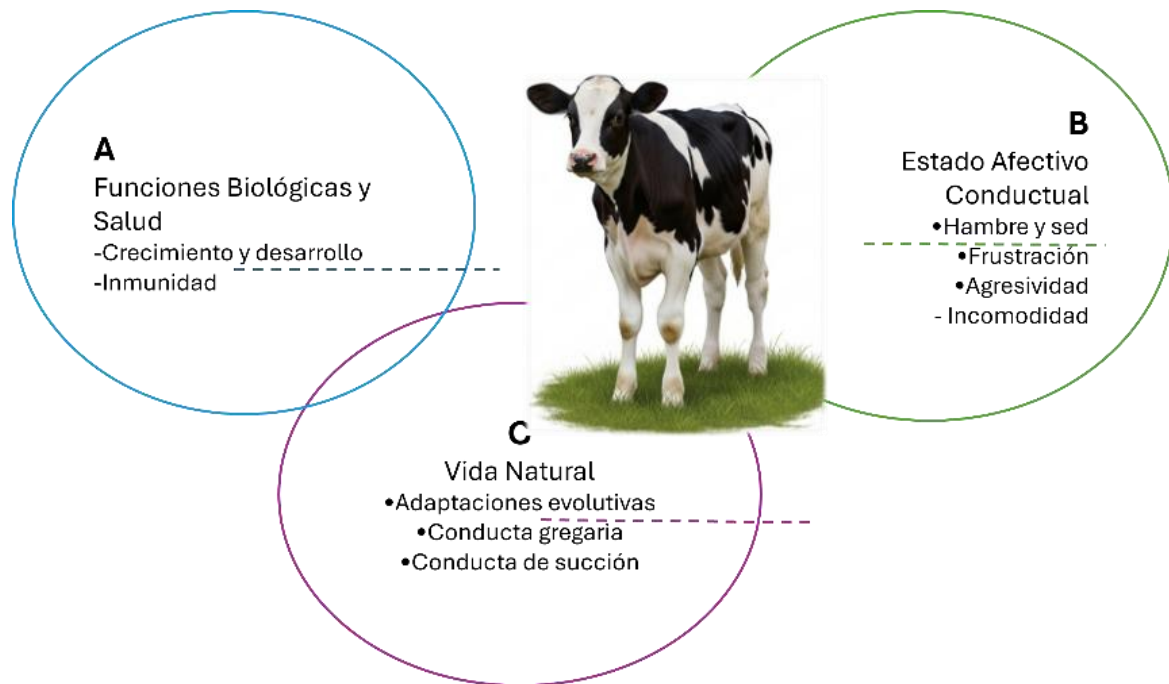
De acuerdo con el reporte de 2021 para la caracterización de la producción lechera en México por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021), la industria lechera mexicana se ha definido en un esquema de heterogeneidad sistémica, con modelos de producción que abarcan un amplio espectro de escala y tecnología. Estos sistemas abarcan desde granjas altamente especializadas y tecnológicamente avanzadas en los estados del norte hasta operaciones tradicionales de pequeña escala en las regiones centro y sur (Camacho-Vera et al., 2017). Independientemente de la escala o el modelo operativo, la crianza eficaz de terneros es un factor determinante para la salud, la productividad y la viabilidad económica a largo plazo del hato (Lassala et al., 2020). Los primeros meses de vida de un ternero son fundamentales para su longevidad y productividad a lo largo de su vida. Por lo tanto, comprender a fondo los diversos enfoques de crianza de terneros y sus respectivos resultados es esencial para cualquier estrategia destinada a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del sector lechero mexicano (Contreras et al., 2024).

#### **2.1.4 Factores en la crianza de terneros**

La crianza de terneros en hatos lecheros es un enorme desafío, por lo que se utilizan diversas prácticas en las granjas para obtener los mejores resultados posibles. Estas actividades se centran en la crianza de hembras sanas, que en el futuro se utilizarán para la renovación del hato, mientras que cualquier ternero que nace es utilizado para sistemas de preengorda o material genético en los hatos. La mayoría de los ganaderos venden estos machos a instalaciones especiales de crecimiento acelerado donde los animales están destinados a convertirse en carne. Con esta opción, el tiempo que se mantienen los animales, y por lo tanto el tiempo de crecimiento, depende en gran medida de la época de lactación en la que los terneros adquieren la capacidad metabólica y la facilidad de crecimiento en periodos futuros. Por lo tanto, en los establos lecheros, independientemente del sexo, la práctica más común es destetar a los terneros de sus madres casi inmediatamente, lo que puede deberse a varias razones: desde el deseo de cuidar mejor al ternero, incluida la administración de la cantidad correcta de leche al día y el calostro de mejor calidad;

para reducir el estrés asociado con el destete de los terneros de sus madres; para reducir la incidencia de enfermedades; y, lo que es en verdad el factor más importante, para poder reducir los costos de crianza asociados con la administración de sustitutos de leche y la venta de leche entera de las vacas, así como la comodidad de cuidar a los cuidadores de los animales. No obstante, en el caso de los terneros machos, los criadores a menudo no prestan atención a la calidad del calostro ni al momento de su administración, por lo que su inmunidad pasiva no es alta. Recientemente, la atención de cada vez más consumidores se ha centrado en el bienestar animal y la calidad de crianza; por lo tanto, se han modificado las prácticas utilizadas en los establos lecheros, para incrementar un comportamiento de crecimiento adecuado e integral.

El manejo de la alimentación durante el primer período de vida del ternero es crucial para asegurar su desarrollo, bienestar y productividad. El efecto de las estrategias de alimentación en el desarrollo de los terneros predestetados se ha reportado en varios de los artículos revisados en este trabajo. Además, el efecto de cada práctica de manejo de la alimentación en el bienestar animal se ha investigado en varias publicaciones. Así, como se explica en la Figura 1, se describen los aspectos clave de cada manejo de la alimentación desde (a) administración correcta de calostro (Seppä-Lassila et al., 2016), (b) alimentación líquida hasta el destete (van Niekerk et al., 2021), (c) alimentación con alimento sólido de inicio (Engelking et al., 2020; Palczynski et al., 2020), y (d) manejo del destete (Bach et al., 2010).



**Figura 1.** Manejo integral propuesto actualmente para llevar a cabo un crecimiento satisfactorio en los terneros con genotipo lechero.

Según los estudios revisados, la ingesta de calostro afecta el bienestar desde una perspectiva de función biológica y salud, ya que es esencial para la inmunidad del ternero. Las publicaciones han demostrado que es crucial proporcionar cantidades suficientes de calostro de alta calidad con contenido nutricional y de inmunoglobulinas y lograr esta inmunidad en la 1.<sup>a</sup> h de vida. El calostro de alta calidad tiene una concentración de IgG >50 g/L (Godden, 2008). En los estudios revisados, se utilizaron dos enfoques para evaluar el impacto del calostro en la inmunidad del ternero, las características del calostro y la asimilación de la inmunidad pasiva en el ternero.

En términos de características del calostro, los sustitutos maternos y comerciales se han estudiado como dos tipos de calostro (según su naturaleza). Los sustitutos comerciales tienen una absorción adecuada de IgG y son menos propensos a estar contaminados microbiológicamente (Lago et al., 2018). Sin embargo, cuando se ofrece calostro materno, los terneros muestran un mayor crecimiento al destete, un mejor desarrollo inmunológico y metabólico y mayores concentraciones de IgG en sangre (Lago et al., 2018; Quigley et al., 2019) . La calidad del calostro materno varía dependiendo de la vaca individual y de los factores de manejo ambiental. Por ejemplo,

varios estudios han demostrado que las vacas multíparas producen mejor calostro que las vacas más jóvenes, ya que tiene una mayor concentración de IgG y mejores propiedades nutricionales (Bach et al., 2010). Sin embargo, un protocolo de vacunación adecuado y una alimentación adecuada de las vacas secas son esenciales para reducir el fracaso de la transferencia pasiva (Lago et al., 2018; Quigley et al., 2019).

El momento de la recolección y el tiempo transcurrido entre la recolección y la administración también son importantes. Si la calidad del calostro es deficiente o se administra en un momento inapropiado, la transferencia de inmunidad pasiva fallará. Esto conlleva una disminución del bienestar de la función biológica y la salud. Por lo tanto, cuanto más se tarde en recolectar el calostro después del parto, menor será la concentración de IgG (Bach et al., 2010), y su administración al ternero debe realizarse lo antes posible (Phipps et al., 2016). Si el calostro no se puede administrar inmediatamente, las prácticas de higiene y almacenamiento se consideran factores clave. En malas condiciones de higiene, el calostro puede estar contaminado bacterianamente (Phipps et al., 2016; Quigley et al., 2019). Si no es posible mantener una higiene óptima, se pueden utilizar tratamientos térmicos como la pasteurización a 60° durante 60 min (Godden, 2008; Lago et al., 2018) o el tratamiento a alta presión a 400 MPa durante 15 min (Phipps et al., 2016). Estos tratamientos reducen la concentración de bacterias patógenas y mantienen la calidad de la IgG (Phipps et al., 2016). Además, el calostro se puede almacenar congelado, ya que la congelación y la descongelación no afectan las concentraciones de IgG siempre que la descongelación se realice al baño maría y la temperatura no supere los 40 °C (Godden, 2008).

También es clave para evaluar la calidad del calostro. El refractómetro Brix es una herramienta precisa, aceptable y rápida para evaluar la calidad del calostro con una repetibilidad excelente (Bartens et al., 2016; Chigerwe & Hagey, 2014). Por consiguiente, el calostro se puede clasificar como bueno si >22% Brix y malo si <18% Brix (Chigerwe & Hagey, 2014). Es importante destacar que no se recomienda mezclar calostro de mala calidad con calostro de buena calidad (Phipps et al., 2016; Quigley et al., 2019). Aunque la calidad del calostro se ha estudiado ampliamente, no se ha

establecido su relación con la cantidad a administrar. Por lo tanto, aumentar la cantidad de calostro, reducir el tiempo entre el nacimiento y la administración del calostro o aumentar la cantidad de leche entera después del calostro se han reconocido como buenas prácticas (Bartens et al., 2016; Chigerwe & Hagey, 2014), y mejoran el bienestar desde una perspectiva de función biológica y salud.

Como se mencionó anteriormente, las características del calostro son tan importantes como la asimilación de la inmunidad del ternero. El éxito o el fracaso de la transferencia de inmunidad pasiva se ha estudiado ampliamente (Bach et al., 2010; Lago et al., 2018). Por ejemplo, se ha encontrado una relación entre la transferencia pasiva exitosa y una menor probabilidad de desarrollar enfermedad entérica o respiratoria (Lora et al., 2018). Además, las concentraciones más bajas de IgG y proteína sérica total en los primeros 3 días de vida se asocian con tasas de crecimiento reducidas (Bartens et al., 2016; Chigerwe & Hagey, 2014).

Todo lo anterior presupone que una buena calidad y cantidad de calostro es esencial para la crianza de terneros y para garantizar el bienestar desde una perspectiva de función biológica y salud en esta etapa (Lora et al., 2018). En resumen, el mejor protocolo de manejo del calostro, con menos fallos en la transferencia pasiva, es administrar un volumen de calostro de alta calidad equivalente al 10-12% de su peso corporal en las primeras 2 h y una comida adicional correspondiente al 5% del peso corporal 6-8 h después para reducir la morbilidad y la mortalidad (Chigerwe & Hagey, 2014; Phipps et al., 2016).

Según los estudios revisados, el manejo de la alimentación líquida afecta el bienestar animal en tres ámbitos (van Niekerk et al., 2021). Desde el punto de vista de la función biológica y la salud, es esencial proporcionar alimentación líquida de buena calidad, concentración y volumen para que el animal esté bien nutrido. Además, la cantidad de alimentación líquida y la frecuencia de la misma afectarán el estado afectivo o el juicio cognitivo, ya que los terneros bien alimentados no deberían sufrir hambre. El sistema de administración también afecta el entorno natural de la vida, ya que la alimentación con pezón se asemeja más al comportamiento natural de succión.

Los terneros deben ser alimentados adecuadamente para cubrir sus requerimientos nutricionales y apoyar el desarrollo y maduración del tracto gastrointestinal, permitiendo que el ternero digiera y absorba nutrientes (Palczynski et al., 2020; Seppä-Lassila et al., 2016; van Niekerk et al., 2021). La ingesta insuficiente de leche retarda el crecimiento postnatal y puede afectar el desarrollo de órganos como los intestinos y las glándulas mamarias (Hammon et al., 2020). La ingesta de alimento líquido también influye en la ingesta de alimento sólido (Quigley et al., 2019) y el crecimiento del ternero. Según Soberon et al. (2012), cuanto mayor sea la ganancia diaria promedio durante el predestete, más leche se producirá en la primera lactancia. La programación epigenética, que aún está bajo investigación, sugiere que la dieta es uno de los factores ambientales más importantes que influyen en la expresión genética de la producción de leche (F. Soberon et al., 2012). Sin embargo, las estrategias óptimas de alimentación son altamente inciertas en los estudios revisados (Hammon et al., 2020). Además, inevitablemente se requerirán ajustes en el manejo de las prácticas de alimentación de los terneros. En esta etapa, se han estudiado diferentes alternativas, considerando el tipo de dieta líquida y suplemento, la cantidad y concentración, la frecuencia o el método de administración. Independientemente de la estrategia adoptada, una correcta higiene es esencial para prevenir problemas de salud en los terneros, reducir la carga bacteriana patógena y romper las cadenas de infección. Por ejemplo, existen varios estudios que se centran principalmente en la limpieza de tetinas y cubos artificiales, ya que estos se presentan como el punto crítico central (Quigley et al., 2019)

Por otro lado, no se encontró una mejora significativa en el desarrollo de los terneros en relación con el tipo de leche. Las publicaciones revisadas se han centrado en el uso de un sustituto de leche, leche de transición o leche descartada (F. Soberon et al., 2012). Sin embargo, cuando se utiliza un sustituto de leche, el factor más crítico es mantener un contenido de proteína por encima del 28%, ya que el contenido de proteína de la leche está directamente relacionado con la ganancia diaria (Bach et al., 2010; F. Soberon et al., 2012). El contenido de grasa debe mantenerse en el rango de 17-25%. Es importante que el sustituto de leche sea de alta calidad, ya que los

sustitutos de leche de mala calidad pueden afectar el bienestar a través de la morbilidad (diarrea) y también el hambre a través de la inanición (Bach et al., 2010).

Existe una amplia variedad de protocolos de alimentación en la bibliografía revisada y no hay consenso sobre la mejor práctica. Tradicionalmente, se ha utilizado la alimentación restringida para promover la ingesta de alimento sólido, pero estas restricciones han resultado en desnutrición e inmunosupresión (Engelking et al., 2020), lo que contribuye a un estado de bienestar negativo. Por el contrario, otros autores han investigado protocolos de administración de ordeño ad libitum, con beneficios para el crecimiento, pero retrasos en el desarrollo del rumen ya que los animales consumen menos alimento sólido (Seppä-Lassila et al., 2016). Por lo tanto, se debe encontrar un equilibrio entre alentar a los terneros a comenzar a comer sólidos y evitar la inanición si se alimentan solo con leche. También se han revisado otros protocolos que involucran la cantidad, frecuencia o concentración de leche. Por ejemplo, se ha demostrado que alimentar con el 20% del peso corporal del ternero en leche reduce la ingesta de alimento y el desarrollo del rumen antes del destete (Mee, 2023). Alternativamente, el desarrollo del rumen es mejor con el 10% del peso corporal (Contreras et al., 2024). Por el contrario, algunos protocolos proporcionan una cantidad de leche independientemente del peso corporal, con cantidades y concentraciones variables. No se conoce el número óptimo de comidas dosificadas por día (Palczynski et al., 2020; van Niekerk et al., 2021).

Varios autores han señalado que el protocolo de alimentación tiene un impacto significativo en el bienestar. Dependiendo del protocolo, los terneros pueden sufrir de hambre o frustración, lo que empeoraría el bienestar animal en estados afectivos o juicio cognitivo y esferas de vida naturales. Para saber si los animales tienen hambre, se podrían estudiar comportamientos orales no nutritivos (Pempek et al., 2016), succión cruzada (Jung & Lidfors, 2001) y vocalizaciones (Bolt et al., 2017). Además, cuando los animales no sienten hambre, participan en más juego locomotor, lo que es un indicador positivo de bienestar (Quigley et al., 2019). A pesar de la falta de un protocolo claro sobre la cantidad, concentración y frecuencia de administración en los resultados de la revisión, varios autores han reportado mejores resultados en términos

de resultados de salud y crecimiento con cantidades fijas de alimento líquido a mayores densidades de nutrientes durante el período de lactancia en comparación con un aumento gradual (Bolt et al., 2017; Jung & Lidfors, 2001).

Independientemente del protocolo utilizado, existen varias maneras de ofrecer leche. La alimentación en balde está muy alejada del comportamiento natural de succión del animal, y enseñar a los animales a beber de un balde requiere entrenamiento y esfuerzo. Hasta el 60% de los terneros saben beber leche de un balde a los 3 días de edad (Mandel et al., 2017). Otra opción es utilizar biberones con tetinas, que son más compatibles con el medio ambiente natural. Con este método, los animales muestran menos succión no nutritiva (Bolt et al., 2017). Además, a lo largo de la literatura revisada, el método de alimentación se ha modernizado con la introducción de comederos automáticos de leche, que se introducen a los animales alrededor de los 5 días de edad y se pueden alojar en grupos de 10 a 15 terneros (Mandel et al., 2017). Estos comederos controlan con precisión la ingesta de leche de los animales (Jorgensen et al., 2017), pero aún se está investigando su efecto sobre el bienestar de los terneros.

Por todo lo anterior, los autores enfatizan la necesidad de proporcionar leche de buena calidad y elegir un protocolo de alimentación adecuado, con una cantidad fija de leche ofrecida al inicio y reducida gradualmente a medida que se acerca el destete, para satisfacer las necesidades nutricionales de los terneros, evitando al mismo tiempo el hambre (Jorgensen et al., 2017; Medrano-Galarza et al., 2017). También es importante monitorear el comportamiento animal para saber si tienen hambre, si hay un aumento de vocalizaciones o comportamientos orales no nutritivos. Se necesita más investigación para determinar la cantidad, concentración y frecuencia óptimas que garanticen el mejor bienestar animal en las tres esferas. La literatura revisada muestra que el manejo de la alimentación sólida tiene un impacto significativo en el crecimiento y el bienestar. A nivel de estados afectivos o juicio cognitivo, un manejo adecuado de la alimentación ayuda a reducir el hambre o las molestias digestivas. La composición de la dieta, la ingesta y la disponibilidad de agua son esenciales para el desarrollo

ruminal y, por lo tanto, afectan el bienestar animal a través de la función biológica y la salud.

El desarrollo ruminal adecuado durante el predestete es crítico. La ingesta de alimento sólido juega un papel fundamental en el desarrollo y la maduración ruminal. El protocolo de alimentación con leche tiene una gran influencia en la ingesta de alimento sólido, y los programas de alimentación con dieta alta en líquido pueden comprometer la ingesta de alimento sólido en las primeras semanas de vida (Jorgensen et al., 2017; Pempek et al., 2016; F. Soberon et al., 2012). El factor más importante en la promoción de la ingesta de alimento sólido es la disminución en la leche disponible después de los 40 días de edad, ya que esto puede conducir a la desnutrición antes de este momento (Medrano-Galarza et al., 2017).

Una dieta sólida debe proporcionar la proteína y la energía necesarias para el crecimiento del ternero (un promedio de 23,4 % de proteína y 32,3 % de almidón en materia seca) (Palczynski et al., 2020). Además, el método de alimentación, la palatabilidad del alimento sólido y la cantidad consumida también son importantes para el crecimiento del ternero y para evitar molestias digestivas (Lusby, 2006), que podrían reducir el bienestar a nivel de estados afectivos o juicio cognitivo. Además del alimento de inicio, las prácticas de alimentación de los terneros deben incluir el suministro de agua ad libitum para maximizar la ingesta de alimento de inicio y el aumento de peso. El aumento de peso se reduce cuando se priva a los animales de agua (Jorgensen et al., 2017; Lusby, 2006) y se deteriora el bienestar animal (Medrano-Galarza et al., 2017). Por otro lado, actualmente se debate si la inclusión de forraje en la dieta de inicio puede beneficiar a los terneros (Lusby, 2006). La alimentación con forraje se ha promovido desde una perspectiva de bienestar. Algunos autores reportan beneficios como el alivio de la acidosis ruminal, la promoción de la diversidad y abundancia microbiana ruminal (Kim et al., 2016), así como una mayor ganancia diaria promedio. La importancia de alimentar con heno no solo para el desarrollo del rumen, sino también para reducir el estrés durante el proceso de destete (Jorgensen et al., 2017). Otros han encontrado efectos negativos de incluir heno, como una reducción en el consumo de iniciador sólido (Mandel et al., 2017), lo cual es crucial porque cuando los

terneros han consumido suficiente iniciador, es el momento de destetarlos (Jung & Lidfors, 2001).

El destete también ha sido objeto de mucha investigación, ya que es un punto de inflexión en el manejo intensivo de la alimentación de terneros y puede causar mucho estrés. El destete es un evento muy estresante para los animales y un desafío para el ganadero (Chigerwe & Hagey, 2014; Hammon et al., 2020; Lora et al., 2018). También afecta el bienestar animal a nivel de funcionamiento biológico y salud, ya que cambia radicalmente la dieta y los terneros necesitan tener un desarrollo ruminal adecuado. Desde el punto de vista de los estados afectivos o el juicio cognitivo, el procedimiento utilizado para llevar a cabo el destete puede causar ansiedad y frustración. Finalmente, a nivel de vida natural, este evento causa cambios de comportamiento en los terneros.

El destete es la transición nutricional más importante para los terneros jóvenes. En las granjas lecheras intensivas, los terneros se destetan antes que, en las granjas libres, donde el destete ocurre alrededor de los 6 meses (Vasseur et al., 2010). En los estudios revisados, se encontró que el momento del destete puede decidirse con base en dos parámetros principales para minimizar los efectos adversos. Puede programarse según la edad del animal o la cantidad de alimento sólido de inicio consumido (Bach et al., 2010; Phipps et al., 2016). Además, el destete puede manejarse gradualmente (eliminación del alimento), diluyendo la leche, o abruptamente eliminando el acceso al alimento líquido (Engelking et al., 2020). Como se explicó anteriormente, la restricción de leche se utiliza comúnmente para fomentar la ingesta de alimentos sólidos y facilitar el destete temprano, pero puede comprometer el crecimiento del ternero si se realiza demasiado pronto (Palczynski et al., 2020). La edad más temprana para realizar este procedimiento es a los 40 días, ya que puede causar desnutrición si se realiza antes (Seppä-Lassila et al., 2016). En todos los estudios revisados (Seppä-Lassila et al., 2016; van Niekerk et al., 2021), este destete se lleva a cabo hasta los 62 días.

Además, la ingesta de alimento sólido se considera el parámetro clave para decidir cuándo destetar a los terneros, y se ha sugerido que los terneros están listos

para el destete cuando han consumido una cantidad mínima de 0,9 a 1 kg de alimento sólido durante tres días consecutivos (Engelking et al., 2020) o 15 kg de carbohidratos no fibrosos acumulados (Lago et al., 2018). El problema de decidir cuándo destetar a un animal utilizando este método es que muchos terneros son destetados a una edad mayor que si la edad hubiera sido el factor decisivo, y se requiere un manejo muy individualizado (Bartens et al., 2016; Chigerwe & Hagey, 2014). El destete gradual se lleva a cabo mediante la eliminación de comidas. Esto fomenta un mayor consumo de alimento sólido y ayuda a desarrollar mejor el rumen (Kim et al., 2016; Lusby, 2006; Vasseur et al., 2010). Es el más similar al destete natural (Lusby, 2006), aunque se ha demostrado que causa una frustración más prolongada en el animal. Por el contrario, el destete abrupto elimina las comidas de una vez y causa menos frustración (Jorgensen et al., 2017). Sin embargo, algunos animales pueden no estar dispuestos a consumir la cantidad mínima de alimento sólido, especialmente si están en asignaciones de leche ad libitum (Vasseur et al., 2010). Finalmente, la última opción es diluir el sustituto de leche hasta que solo quede agua, y luego retirar el pezón, lo que causa una frustración menor

Sin embargo, independientemente de cómo se realice el destete, es un proceso estresante para los terneros (es decir, la ganancia diaria disminuye al día siguiente del destete y los terneros tienen altas concentraciones de cortisol (Black et al., 2017). Se sabe que los terneros aumentan la frecuencia de vocalizaciones durante este período, una medida de estrés y angustia (Jorgensen et al., 2017; Kim et al., 2016; Medrano-Galarza et al., 2017), pero aún hay una falta de conocimiento sobre cómo minimizar el estrés sufrido durante este período. Sin embargo, no se han investigado los efectos de este proceso sobre los estados afectivos o el juicio cognitivo.

Por lo tanto, el manejo del destete es fundamental, ya que debe llevarse a cabo para evitar la disminución de la ingesta de nutrientes y la pérdida de peso (Black et al., 2017). Las mejores prácticas de manejo indican una reducción gradual de la leche ofrecida a partir de los 40 días de edad y el destete completo cuando consumen más de 1 kg de alimento durante tres días consecutivos. El bienestar de los terneros no se tiene suficientemente en cuenta al realizar ajustes de manejo. Aún existen muchas

prácticas comunes de manejo de la alimentación de terneros, particularmente en el sector lechero, que son perjudiciales para la salud y el bienestar de los terneros. Comprender los problemas de bienestar causados por el manejo y las consecuencias de no hacerlo ayudará a prevenir problemas futuros (Medrano-Galarza et al., 2018).

No obstante, aunque actualmente a nivel mundial existe una percepción de que existe un protocolo estandarizado para tener una base sobre la cual seguir en el periodo de cría y lactancia, en zonas áridas esto puede tener un factor poco visible, debido a las características propias de la región en donde los micronutrientes dependen de factores como el suelo y el agua, los cuales limitan la transferencia de nutrientes al forraje o ingredientes de origen vegetal (Batistel et al., 2016b; Hernandez et al., 2023; Roshanzamir et al., 2020). Alguno de estos micronutrientes son los minerales en sus dos clasificaciones macroelementos y oligoelementos o minerales traza, los cuales son relevantes en regiones áridas debido a las deficiencias en el forraje.

No obstante, a pesar de estudios relativamente nuevos que describen el impacto de la deficiencia de micronutrientes, los temas más estudiados siguen siendo el manejo del calostro y el alimento sólido de arranque. Sin embargo, estudios recientes ha postulado que el uso de minerales en dietas de iniciación en terneros puede ser el comienzo para dilucidar el impacto en el crecimiento, salud y bienestar de los terneros (Batistel et al., 2016b; Roshanzamir et al., 2020).

## **2.2 Minerales en la nutrición de terneros**

La suplementación mineral es crucial para los terneros lecheros durante el destete, independientemente de un buen manejo, debido a su papel esencial en el crecimiento, la inmunidad, la defensa antioxidante y la prevención de problemas de salud (Silva et al., 2022). La baja biodisponibilidad de los alimentos naturales y las mayores demandas fisiológicas durante el destete hacen necesaria la suplementación en dietas sólidas o inyectadas. Consideraciones económicas y prácticas respaldan aún más el uso de complejos minerales como una estrategia eficaz y asequible para garantizar la salud y la productividad de los terneros.

### 2.2.1. Funciones y metabolismo de los minerales

Los macrominerales son nutrientes esenciales que los bovinos requieren en cantidades relativamente grandes para mantener la homeostasis y las funciones fisiológicas normales. Estos minerales incluyen Calcio (Ca), Fosforo (P), Sodio (Na), Cloro (Cl), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Azufre (S) (Batistel et al., 2016a). A diferencia de los microminerales, los macrominerales son componentes estructurales de los huesos, dientes y tejidos blandos, además de actuar como cofactores enzimáticos y participar en la regulación ácido-base, la transmisión nerviosa y la contracción muscular.

Los bovinos lecheros en la etapa lactante tienen una alta demanda de minerales debido a su rápido crecimiento y desarrollo. En este contexto, la leche materna o los sustitutos lácteos deben proporcionar cantidades adecuadas de estos nutrientes para evitar deficiencias que puedan comprometer la salud y el desempeño productivo de los terneros (Goff, 2018). Sin embargo, la suplementación mineral en esta etapa también debe considerar factores como la biodisponibilidad de las fuentes minerales y las interacciones entre diferentes elementos (Weiss, 2004).

Añadir un 5% de grasa a un pienso de inicio para terneros no afectó la absorción de Ca (Fielding et al., 1985). El factor principal que afecta la absorción de Ca es el contenido de Ca en el alimento; cantidades crecientes disminuyen la absorción aparente. Se puede incluir hasta un 1,31% de Ca en el pienso de inicio sin reducir el consumo de alimento ni el rendimiento (Alfaro et al., 1988). Los terneros se adaptaron rápidamente a una dieta deficiente en Cl (0,038%) mediante la reducción del Cl en plasma, saliva y orina (Burkhalter et al., 1980). Se observó toxicidad por magnesio (reducción del consumo de alimento, diarrea) en terneros alimentados con dietas con más del 1% de Mg, pero no se observaron efectos en el rendimiento con dietas con 0,25 o 0,7% de Mg (Quillian et al., 1980). Miller et al. (1987a) sugirió que el contenido de P en las dietas para terneros de 2 a 4 meses no sea inferior al 0,32 % de la MS de la dieta. En estudios de palatabilidad con suplementos de K, terneros de 90 días encontraron el  $\text{KHCO}_3$  y el  $\text{KCH}_3\text{CO}_2$  más palatables que el KCl, y el  $\text{K}_2\text{CO}_3$  el menos palatable (Neathery et al., 1980).

### **2.2.2. Minerales traza, clave para el crecimiento y salud**

Los MI son elementos esenciales en concentraciones pequeñas, pero críticas para el metabolismo y la fisiología de los rumiantes (Teixeira et al., 2014). Estos minerales participan como componentes estructurales o cofactores de enzimas y proteínas, regulando procesos como la función inmune, el crecimiento y la salud en terneros Holstein lactantes (Jung & Lidfors, 2001). De acuerdo con diversos modelos de nutrición en rumiantes: NASEM (2021), INRAE (2020) y FEDNA (2024) las necesidades críticas de minerales trazan se ven influenciadas por factores como el suelo, los forrajes, los ingredientes y la biodisponibilidad en conjunto con las interacciones entre los diferentes minerales (Hernandez et al., 2023). Además, un adecuado balance de los minerales traza es esencial para prevenir enfermedades metabólicas y optimizar de esta manera la eficiencia productiva (Spears, 2003).

Actualmente, se sabe que 10 oligoelementos son esenciales para el ganado, entre ellos Cr, Co, Cu, I, Fe, Mn, Mo, Ni, Se y Zn (Glombowsky, Aleksandro S da Silva, et al., 2018; Springman et al., 2018). Aunque otros oligoelementos pueden considerarse esenciales, su contribución a la nutrición del ganado sigue siendo en gran medida desconocida (Cashman, 2002; Mousavi-Haghshenas et al., 2022). De estos 10 oligoelementos esenciales, solo 6 tienen relevancia práctica para la adecuación de oligoelementos en el ganado bovino (Mousavi-Haghshenas et al., 2022). Estos incluyen Se, Cu, Zn, Mn, I y Co. Las concentraciones de estos elementos en el forraje de para alimentación de ganado lechero varían desde comúnmente deficientes hasta generalmente adecuadas (Teixeira et al., 2014). En el caso de la crianza de terneros, es fundamental comprender bien las condiciones regionales y las implicaciones para el manejo que afectan la nutrición de oligoelementos en los ingredientes con los que se formulan las dietas ya sea de iniciación o de destete (Roshanzamir et al., 2020).

### **2.2.3. Zinc**

El Zn influye en múltiples funciones esenciales dentro del cuerpo asociadas con la activación de enzimas y proteínas, el desarrollo y almacenamiento de hormonas, el desarrollo del crecimiento, la cicatrización de la piel y heridas, la regulación

inmunológica y la función del sistema nervioso central. (McDowell, 2003). El receptor hormonal, la capacidad de respuesta, la producción, el almacenamiento y la secreción dependen de cantidades adecuadas de Zn para su correcto funcionamiento (McDowell, 2003). Además, el Zn está involucrado en más de 200 activaciones enzimáticas que son esenciales para la síntesis de proteínas, el metabolismo de carbohidratos, la transcripción y traducción, y la regulación de la expresión génica (Ahola et al., 2004, McDowell, 2003). Suttle (2010a) informó que el Zn es responsable de la integridad estructural y funcional de más de 2000 factores de transcripción y es esencial para la formación del dominio unión-zinc en las proteínas de unión al ADN. La testosterona, la insulina y los corticosteroides suprarrenales son las hormonas que más se ven afectadas durante las deficiencias de Zn (McDowell, 2003). De igual manera, se han reportado funcionalidad y desarrollo anormales en los órganos reproductores masculinos de terneros con deficiencia de Zn (McDowell, 2003). Suttle (2010a) describió cómo la limitación de Zn genera hipogonadismo en terneros machos, cabritos y corderos machos. El autor concluyó que el Zn puede generar retraso en el desarrollo de machos desde el momento del nacimiento.

Específicamente en terneros de razas lecheras, el Zn ha demostrado aumentar niveles plasmáticos durante varias horas al suministrarse inyectado, generando concentraciones hepáticas altas por efecto domino de macrominerales que requieren del Zn como cofactor de su propio metabolismo (Teixeira et al., 2014). De acuerdo con Teixeira et al. (2014), la administración de 1 mL de un mineral inyectable que contenía 60 mg/mL de Zn incrementó la capacidad de metabolismo de mineral a nivel hepático durante los primeros 15 días en terneros recién destetados. Así mismo los autores señalaron una reducción en enfermedades relacionadas a problemas gastrointestinales durante este crítico periodo. Por otra parte, Duffy et al. (2023) describieron que la suplementación dietaria sin restricción de Zn mejora el desempeño productivo en vaquillas durante su primera lactación. En general se ha demostrado en diversos estudios que la suplementación con Zn no solo tiene un efecto regulador con otros minerales o mejorando el desempeño en un mediano plazo, sino también su asociación con aminoácidos limitantes como la metionina. Ma et al. (2020) reportaron que la suplementación con una fuente de Zn inyectado mejoró la ganancia diaria de

peso en terneros postnatales al encontrar una asociación con metionina, generando una absorción a nivel intestinal mejorando la capacidad de metabolismo y la reducción de diarreas. Bordignon et al. (2019) observaron que la administración con Zn y un suplemento como fuente de vitaminas estimula la respuesta inmunitaria al incrementar la actividad antioxidante, lo que los autores asociaron con un confort en la salud del ternero incrementando su capacidad de ganancia diaria de peso. Finalmente, los autores concluyeron que el Zn se asocia con vitaminas como A y E para generar un efecto metafiláctico en los terneros durante la lactancia. Si bien la suplementación con zinc puede mejorar la ganancia de peso, existe información no concluyente que reporte que describa el estado de salud de los terneros prerumiantes debido a la suplementación con Zn inyectable en periodos óptimos previo a la transición al destete, y si las suplementaciones con Zn pueden afectar negativamente el rendimiento y alterar los parámetros sanguíneos (Srivastava et al., 2025).

#### **2.2.4. Selenio**

El Se es un oligoelemento que desempeña un papel importante en la salud y el rendimiento del ganado lechero. En vaquillas, la deficiencia de Se puede tener consecuencias económicas significativas, como la reducción de la fertilidad, la retención placentaria y la incidencia de mastitis y metritis. El Se se ha descrito ampliamente en su efecto al administrarse en vaquillas al primer servicio en el aumento de la fertilidad y la reducción de la muerte embrionaria durante el primer mes de gestación. En el sistema inmunitario de vaquillas, el Se participa en la formación y la actividad de las células T auxiliares, las células T citotóxicas y las células asesinas naturales (NK). Ran et al. (2010) reportó que una deficiencia de Se provoca trastornos en el período perinatal que alteran la calidad de la leche en las vacas. Con base a trabajos similares a los antes descritos, el NASEM (2021) señaló al Se como un oligoelemento esencial que participa en la defensa contra la acumulación de hidroperóxidos del metabolismo celular o estrés oxidativo dañino. De acuerdo con Sordillo et al (2016) esta función biológica se logra mediante selenoproteínas, como la familia del glutatión peroxidasa (GPx), las yodotironina desyodasas y las tiorredoxinas reductasas, en las que él Se es un componente estructural (Brigelius-Flohé et al.,

2013). De acuerdo con Mehdi et al (2016) estas proteínas contienen aminoácidos selenocisteína (Secys) en posiciones críticas del centro activo de la enzima, por lo que vuelve al Se una mineral traza esencial con implicaciones múltiples en el organismo de los bovinos.

En el caso específico de los terneros lecheros, el Se se ha relacionado como coadyuvante en periodos críticos de estrés como el transporte, enfermedades o desnutrición. Dreher et al. (2019) concluyeron que el estatus o perfil mineral en las madres de terneros lecheros durante el último tercio de gestación condiciona la suplementación mineral en el calostro, por lo que la deficiencia en el calostro, pudiera afectar el reflejo de succión en el ternero, debido a que el Se es crucial para proteger las células nerviosas y la transducción de señales. Otra limitación en el periodo de lactancia se debe a que regularmente el calostro no aporta la cantidad suficiente de Se, lo que limita su metabolismo en los primeros 15 días de vida. Esto conlleva que los terneros desarrollen un sistema inmunitario inmaduro y carezcan de anticuerpos (Salles et al., 2014).

Finalmente, en terneros jóvenes, la deficiencia de se puede causar enfermedades de músculo blanco (degeneración y necrosis del músculo esquelético y cardíaco), lo que provoca síntomas como rigidez, cojera, insuficiencia cardíaca, falta de crecimiento, pérdida de peso y diarreas (Spears, 2015). La deficiencia de Se también se asocia con una respuesta inmunitaria reducida, lo que aumenta la susceptibilidad de los terneros a enfermedades (Spears et al., 2002).

La suplementación con Se es más común en forma oral o en las sales minerales utilizada en la dieta de iniciación o dieta sólida (Spears et al., 2015); sin embargo, en los últimos años se ha comenzado la utilización de Se inyectable en vacas durante el periodo de reto o periodo seco. Esto se debe a que diversos estudios han señalado que la suplementación con Se en las madres aumenta en proporciones similares en leche, lo que beneficia a los terneros lactantes al proporcionarlo en la propia leche (Bruzelius et al., 2007). El Se inyectable (como el selenato de bario) se ha estudiado en novillas lecheras, mostrando efectos sobre la actividad de la glutatión peroxidasa

sanguínea, una importante enzima antioxidante, aunque no se detalló el impacto directo en los terneros lactantes (Ceballos-Márquez et al., 2010).

### **2.2.5. Cobre**

En la mayoría de los mamíferos, y dependiendo de la especie, la absorción de Cu se limita al intestino delgado (Evans, 1973). En pequeñas cantidades, el Cu se transporta desde la pared celular de la mucosa intestinal hasta la serosa del enterocito y dentro del citoplasma celular del enterocito. Diversos estudios han demostrado que la absorción de Cu se ve facilitada por proteínas específicas de minerales, como la albúmina, la ceruloplasmina, la proteína transportadora de cobre (Crt1 y Crt2), el citocromo c oxidasa (COX17) y las proteínas transportadoras de metales divalentes no específicas (DMT; Suttle, 2010a). Aunque no se considera que el DMT esté involucrado en la regulación de la absorción de Cu cuando el Cu es limitado o hay otros oligoelementos ausentes, se sabe que está involucrado en la absorción de Cu, Zn, Fe y Mn (Hill & Link, 2009; Cater & Mercer, 2005). La proteína transportadora de Cu tiene tres regiones transmembrana, lo que crea un canal para que el Cu se transporte a través del citosol de la célula hasta una proteína de unión en espera (Hill y Link, 2009). La tasa de absorción de Cu puede variar con la fuente de Cu disponible. Gran parte del Cu liberado de la digestión ruminal generalmente no se puede absorber una vez precipitado como sulfuro de cobre (CuS) (Suttle, 2010a). El nitrato de Cu (CuNO<sub>3</sub>) y el sulfato de Cu (CuSO<sub>4</sub>) tuvieron las tasas de absorción más altas (Chapman y Bell, 1963). Además, el estudio descubrió que el óxido de Cu (CuO) tuvo una de las tasas de absorción más bajas (Chapman y Bell, 1963).

Debido a estos antecedentes en su transporte, Jenkins & Hidiroglou (1990) describieron la toxicidad del Cu en terneros, la cual se produjo a 1.000 mg/kg en el sustituto de leche. El nivel superior seguro de Cu en el sustituto de leche para la alimentación de terneros fue de 50 mg/kg (Jenkins & Hidiroglou, 1989). Jenkins & Hidiroglou (1990) sugirieron un nivel de 10 mg/kg de Cu en el sustituto de leche porque la alimentación con 50 mg/kg de Cu o más aumentó significativamente el contenido de Cu de los tejidos no tiroideos. Sin embargo, la suplementación con Cu, incluyendo cuando es inyectable, genera que el Cu sea altamente absorbido durante el periodo

de lactancia, lo que implica que los terneros lactantes presentan un coeficiente de absorción de Cu relativamente alto, típicamente alrededor de 0.60 mg/día que disminuye significativamente a medida que el rumen se desarrolla (hasta 0.01-0.05 en adultos). Esto sugiere que el periodo de lactancia es un período crítico para la absorción de cobre en los terneros, lo que potencialmente hace que la suplementación con cobre sea más efectiva durante esta etapa que en etapas posteriores de la vida (Salles et al., 2008). Sin embargo, los estudios directos sobre el cobre inyectable, específicamente en terneros lecheros lactantes, no se han detallado actualmente, por lo que se requieren estudios que describan los procesos y status a nivel fisiológico.

#### **2.2.6. Manganeso**

Similar al Cu y Zn, el Mn influye en la actividad enzimática y la reproducción, así como en el desarrollo óseo, el metabolismo de lípidos y carbohidratos, la función y estructura celular, la salud inmunológica y la función del SNC (McDowell, 2003). Gran parte de la investigación que se ha realizado sobre las funciones del Mn se centra en las aves de corral, ya que los animales monogástricos son más susceptibles a las deficiencias en comparación con los rumiantes (Ahola et al., 2004; McDowell, 2003). El Mn puede funcionar como activador enzimático y constituyente de metaloenzimas (McDowell, 2003). Las metaloenzimas del Mn se limitan a la arginasa, el piruvato carboxilasa (metabolismo de lípidos y carbohidratos) y la manganeso-superóxido dismutasa (protección celular; Suttle, 2010a, McDowell, 2003). Sin embargo, existen muchas enzimas que dependen del Mn para su activación, entre ellas: hidrolasas, quinasas, descarboxilasas y transferasas (McDowell, 2003). La glicosiltransferasa es una de las transferasas más reconocidas y estudiadas. El Mn es necesario para la activación de la glicosiltransferasa, cuya principal función es la síntesis de mucopolisacáridos para el desarrollo de la matriz orgánica ósea (McDowell, 2003).

Los terneros nacidos de vacas con deficiencia de Mn pueden presentar diversas anomalías esqueléticas, como rigidez, patas torcidas, agrandamiento de las articulaciones, huesos cortos de las patas con menor resistencia a la rotura, enanismo, inestabilidad y acortamiento de los huesos nasomaxilares. Estas deficiencias también pueden provocar temblores nerviosos, incoordinación general y temblores musculares.

(Spears, 2015). En otro estudio en el que terneros lecheros recibieron dietas con diferentes niveles de Mn, la suplementación con Mn no afectó significativamente los niveles séricos de calcio, fósforo inorgánico ni la actividad de la fosfatasa alcalina. Sin embargo, la suplementación con manganeso contrarrestó parcialmente los efectos negativos del fosfato monocálcico en el aumento de peso durante las últimas etapas del período de alimentación (Hawkins et al., 1955). Esto sugiere que la suplementación con Mn puede ayudar a mitigar ciertos desequilibrios dietéticos, pero no altera ampliamente los marcadores del metabolismo mineral en sangre. No obstante, las deficiencias de Mn pueden generarse rápidamente. De acuerdo con Cashman et al. (2011), la única fuente de Mn para un ternero neonato es mediante el calostro, debido a que la concentración de Mn puede alcanzar 100-160 µg/L que en la leche de transición (20-50 µg/l), con una rápida disminución en los primeros tres días de lactancia. No obstante, aunque la suplementación oral de Mn a las vacas puede aumentar el contenido de Mn en la leche, esto solo puede ocurrir con dosis altas durante un período prolongado, por lo que la fuente de Mn en terneros se encuentra comprometida constantemente. Esto indica que los terneros reciben más manganeso durante el período inicial de lactancia a través del calostro, y la suplementación inyectable u oral en las vacas puede ser necesaria para mantener niveles más altos de Mn en la leche.

### **2.3. Vías de administración de suplementos minerales**

La suplementación mineral en el ganado lechero se refiere a la práctica de proporcionar minerales esenciales, ya sea a través del alimento, suplementos orales o inyecciones, para garantizar una salud, productividad y rendimiento reproductivo óptimos (Lim et al., 2024). La suplementación mineral inyectable es un método específico en el que los minerales se administran mediante inyección, evitando el sistema digestivo y los posibles problemas de absorción asociados con la suplementación oral. De acuerdo con Lim et al. (2024), actualmente las suplementaciones minerales deben considerarse necesarias independientemente de los ingredientes y la naturaleza de su origen, debido a que se ha demostrado que todos los ingredientes presentan deficiencias que afectan silenciosamente la salud del

animal y la productividad del sistema de producción (Castro et al., 2019; Guo et al., 2023; Lim et al., 2024).

De acuerdo con diversos estudios, la suplementación mineral es crucial para mantener el equilibrio mineral en las vacas y vaquillas, debido a que las funciones metabólicas y la salud dependen de prevenir problemas de salud relacionados directa o indirectamente con desequilibrios minerales (Castro et al., 2019).

### **2.3.1. Suplementación oral**

Los minerales pueden mezclarse directamente con el alimento o el agua de bebida de los terneros durante la fase de lactancia. Este método es especialmente adecuado para terneros en confinamiento individual, ya que reduce la variación en la ingesta de minerales en comparación con los métodos de libre elección o donde los terneros pueden socializar y consumir grupalmente. Sin embargo, añadir minerales al agua solo es práctico si los terneros no tienen acceso a fuentes de agua alternativas (Olson, 2007). Por lo tanto, se puede partir del supuesto de que los terneros lactantes consumen mezclas minerales antes del destete. Actualmente, diversos estudios han medido la ingesta diaria promedio de mezclas minerales (que contienen sal y otros minerales) por parte de los terneros, con valores que oscilan entre 15,7 g/día y 39,3 g/día, dependiendo del contenido de sal de la mezcla (Hurlbert et al., 2022; Swecker et al., 2023; Makau et al., 2018). No obstante, de acuerdo con Swecker et al. (2023), en un estudio de comportamiento se observó que solo un 23% de los terneros visita activamente los comederos con minerales durante los períodos de observación, lo que indica variabilidad en la ingesta individual. Estas mezclas minerales se ofrecieron a libre elección, lo que permitió a los terneros consumir minerales por vía oral según sus necesidades (Swecker, 2023).

### **2.3.2. Suplementación inyectable**

La suplementación con inyecciones de minerales traza en el ganado lechero en general es una nueva estrategia específica para garantizar un estado mineral

adecuado, particularmente cuando la suplementación oral es insuficiente o existe una desconfianza del compuesto activo (Lusby, 2006).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Periodo experimental y lugar de estudio**

El experimento se realizó en la parte intermedia del invierno de 2023 a 2024, en el área de crianza de la Unidad Experimental Bovina del Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA), perteneciente a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). El Instituto se ubica en el Ejido Nuevo León, Valle de Mexicali, Baja California, México. El sitio georreferenciado está específicamente a una latitud norte de 32.39° y longitud oeste de 115.29°. El clima predominante es desértico con temperaturas extremas máximas en verano (> 45 °C), y mínimas en invierno (0 °C); la precipitación media anual es de 77.80 mm distribuida mayormente en época de invierno (INEGI, 2024).

#### **3.2. Ética, animales y manejo preexperimental**

Todos los procedimientos y recolección de datos del experimento se apegaron a las diversas legislaciones federales aprobadas para el cuidado de los animales en México: NOM-012-ZOO-1993 (Especificaciones para la regulación de productos químicos, farmacéuticos, biológicos y alimenticios para uso en animales o consumo por estos), NOM-051-ZOO-1995 (Especificaciones del trato humanitario de los animales durante la movilización), NOM-062-ZOO-1999 (Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de animales de laboratorio), y NOM-061-ZOO-1999 (Especificaciones zoonosanitarias para productos alimenticios destinados al consumo animal). Además, el estudio se realizó de acuerdo con los procedimientos éticos del Instituto de Ciencias Agrícolas y de la Universidad Autónoma de Baja California (Proyecto 200/3733 y 200/5/C/52/25).

Se utilizaron 18 neonatos de la raza Holstein (10 hembras y 8 machos), nacidos en parto natural, no distócico, sanos y sin problemas físicos ni de locomoción. Los neonatos se transportaron en un dispositivo móvil desde el lugar del parto hasta la sala de crianza a los 30 min después de nacer y de haber sido limpiados por la madre, siguiendo las recomendaciones de Ventura et al. (2013). Todos los terneros se pesaron individualmente (PV al nacimiento) al ingresar a la sala de crianza. Luego, se

alojaron en corraletas individuales elevadas, equipadas con un comedero, un bebedero y un portabiberón. Las dimensiones de las corraletas fueron de 170 × 100 × 95 cm, y estaban construidas con tubo y piso tipo reja de madera. Las corraletas se encontraban dentro de un galpón de paredes sólidas y aisladas, que contaba con ventilación mediante ventanas corredizas. La alimentación consistió en ofrecer 2 L<sup>-1</sup> de calostro por vía oral con apoyo de un biberón especial dentro de la primera hora de vida y, 12 h después, se volvieron a alimentar con la misma cantidad de calostro. Entre los días 2 y 3 posnacimiento, los terneros se alimentaron con 4 L/d de leche de transición; a partir del día 4, se les ofreció la misma cantidad de leche fluida hasta el 56 predestete. Durante los días últimos 4 días, la leche se condiciona a una reducción del 25% para garantizar una ingesta de dieta sólida eficiente y reducir estrés por destete abrupto (Eckert et al., 2015; Rosenberger et al., 2017; Ventura et al., 2013) . Los horarios de alimentación fueron a las 06:00 y 18:00 h, en una proporción 50:50. Tanto la leche de transición como la fluida se ofrecieron con ayuda de biberones provistos de mamilas de goma con forma anatómica que imitaban un pezón, lo que garantizó un consumo constante y total de las cantidades diarias. La composición nutricional promedio del calostro y de la leche se presenta en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Composición química promedio del calostro y de la leche con la que los terneros suplementados con dos aplicaciones de mineral traza inyectable y tratamiento control fueron alimentados durante el periodo de lactancia.

Variables <sup>1</sup>	Calostro	Leche
Grasa (%)	6.28	2.76
Solidos no grasos (%)	18.70	12.94
Densidad (g/mL)	1023.61	1041.31
Proteína	14.42%	4.24%
Lactosa	4.37%	6.35%
Temperatura	21.5°C	20.5°C
pH	7.01	6.74
Punto de congelación	-0.61°C	-0.71°C
Conductividad	4.52	4.52
Solidos totales	23.95%	20.70%

<sup>1</sup>Valores obtenidos mediante la determinación con analizador electrónico (Lactoscan, Bulgaria).

Cabe mencionar que, además de la dieta líquida, los terneros se alimentaron *ad libitum* con dieta sólida dos veces al día (06:00 y 18:00 h) durante el periodo de prueba (día 3 – 60), considerando una tasa de rechazo del 15 % como se describe en el manual de crianza de ganado lechero (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; NASEM, 2021). La dieta sólida se formuló para cubrir los requerimientos nutricionales de terneros lecheros en crecimiento, con un consumo de 4 L de leche (energía metabolizable = 2.8 Mcal/kg de materia seca y 16 % de proteína cruda; NASEM, 2021). Los ingredientes y la composición química de la dieta sólida se muestran en el Cuadro 3. El agua también se ofreció a libre acceso, rellenando los bebederos con agua limpia y fresca a las 06:00, 12:00 y 18:00 h. La limpieza del biberón, mamila, y bebedero se realizaba 2 veces al día para evitar contaminaciones.

**Cuadro 3.** Composición química (base % MS) de la dieta sólida utilizada para alimentar a los terneros Holstein suplementados con minerales traza inyectables, durante el período de lactancia.

Ingredientes (g/kg de MS)	
Heno de alfalfa	150
Heno de trigo	100
Grano de trigo	250
Grano de maíz en hojuelas	300
Harina de soya	180
Sal de mar grano con premezcla mineral	10
Bicarbonato de sodio	10
<sup>1</sup> Composición química (g/kg de MS)	
Materia seca	89.78
Proteína cruda	18.53
Extracto de éter	3.59
Fibra detergente neutra	21.48
Fibra detergente ácida	12.68
Ceniza	4.77

<sup>1</sup>La determinación de la composición química se realizó por los métodos oficiales de la AOAC 2023.

### 3.3 Diseño y manejo experimental

El periodo de prueba experimental comprendió entre los días 3 y 60 posnacimiento, por lo que los terneros se agruparon en 4 combinaciones de

tratamientos el primer día de la prueba. Estos grupos se formaron al dividir los terneros por sexo y, dentro de cada sexo, se asignaron aleatoriamente a uno de los dos niveles del factor MI (sin y con). Así, las combinaciones de tratamiento generadas a partir de un arreglo factorial  $2^2$  (sexo y MI) bajo un diseño completamente al azar fueron las siguientes: 1) hembras sin MI (n= 4), 2) hembras con MI (n= 4), 3) machos sin MI (n= 5) y 4) machos con MI (n= 5). Los neonatos tratados con MI recibieron dos dosis inyectadas de 1 mL/animal de Multimin 90® (Axiota Animal Health, CO, EE. UU.) en los días 3 y 34 posnacimiento. Cada mililitro de este producto contiene 60 mg de Zn, 10 mg de Mn, 5 mg de Se y 16 mg de Cu. Por su parte, los terneros que no recibieron MI fueron inyectados al mismo tiempo con una dosis similar de suero salino, como efecto placebo. El protocolo de administración de MI se definió de acuerdo con los resultados y las recomendaciones de trabajos previos (Texeira et al., 2014; Bates et al., 2020).

### **3.4. Evaluación de las variables de estudio**

La toma de datos y muestras se diseñó para evaluar el comportamiento productivo, parámetros fisiológicos, perfiles hematológicos, metabolitos sanguíneos y electrolitos en sangre, los cuales se tomaron y registraron cada 10 días desde el nacimiento hasta el destete (60 d de edad). Los muestreos se realizaron de manera similar para cada ternero en ambos grupos de estudio en los días 0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de vida, en tres horarios específicos: mañana (05:00 h), mediodía (13:00 h) y noche (20:00 h).

#### **3.4.2. Comportamiento productivo**

Al momento de su nacimiento, el PV fue registrado antes de su ingreso a la corraleta individual, como se describió anteriormente. Posteriormente, cada 10 días durante el muestreo matutino, se registró el aumento de peso en una báscula ganadera, tras el pesaje. La ganancia diaria de peso (GDP) se calculó a partir del aumento de peso en el muestreo correspondiente, restándole el peso anterior. Finalmente, el dato calculado de cada ternero se dividió entre los 10 días transcurridos en el nuevo registro. El consumo de dieta sólida se estimó a partir del consumo total

ad libitum registrado durante los 60 días y, finalmente, se dividió entre los días del periodo experimental. El registro diario se llevó a cabo ofreciendo el alimento por las mañanas (Báscula Rino® México 3 kg Cap. Máx.) y dando una segunda ración por la tarde, respetando que los terneros tuvieran un mínimo de 15% de rechazo por día. Al día siguiente se pesaron y se registraron los rechazos, teniendo, por consiguiente, el alimento consumido.

### **3.4.2. Variables fisiológicas**

Las variables fisiológicas evaluadas fueron temperatura rectal (TR), oxigenación ( $SpO_2$ ), número de pulsos y frecuencia cardíaca (sístole y diástole, mmHg), las cuales se midieron tres veces al día (06:00, 12:00 y 18:00 h) en los días 1, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de la prueba en la corraleta. Los terneros se sujetaron para introducir un termómetro digital (FlashCheck® Needle Probe Thermometer, modelo No. 11089-01, USA) en el recto para obtener la TR. Posteriormente, se colocó en su oreja izquierda un sensor infrarrojo conectado a un oxímetro con detector de pulso (lpm), que determinó los niveles de saturación de oxígeno ( $SpO_2$ ) (KontroLab, Shenzhen, China). Finalmente, se colocó una banda en forma de brazalete, conectada a una manga inflable, en el nivel de los huesos metacarpianos III y IV, para la determinación electrónica de la sístole y la diástole (mmHg). La medición se realizó mediante una microcomputadora conectada a un compresor (petMAP Graphic II, Shenzhen, China).

### **3.4.3. Hemogramas y concentración de analitos**

Para la determinación de los perfiles hematológicos, se obtuvo una muestra de sangre total por venopunción con un colector con anticoagulante en EDTA de 5 mL, siguiendo las instrucciones del fabricante. Para salvaguardar el bienestar de los terneros, se utilizó lidocaína en gel al 5% en el sitio de la extracción y se dejó actuar durante 3 minutos antes de la punción. Posterior a la colecta, las muestras sanguíneas fueron homogeneizadas suavemente por inversión en tres ocasiones e inmediatamente colocadas en hielo para preservarlas hasta su análisis. Una vez ya en el laboratorio, las muestras se homogeneizaron en un inversor para asegurar su homogeneización y mezclarse, generando una distribución uniforme de células. Los

perfiles hematológicos se obtuvieron mediante un analizador hematológico veterinario (Mindray BC-2800 Vet, USA). Los parámetros evaluados fueron: conteos de glóbulos blancos, rojos y plaquetas, así como la concentración de hemoglobina, el hematocrito, el volumen corpuscular medio, la hemoglobina corpuscular media, la concentración media de hemoglobina corpuscular, la amplitud de distribución de eritrocitos, el volumen plaquetario medio y la amplitud de distribución plaquetaria.

Tras registrar las variables fisiológicas por la mañana y aprovechando el método de punción para la colecta de sangre, se tomó una muestra adicional de 10 mL para la determinación de analitos asociados al metabolismo energético y proteico, así como al equilibrio del metabolismo lipídico. Para esto, se utilizaron tubos de tapa roja que contenían activador de coagulación, aplicado por aspersion en la pared del tubo, para acelerar la formación y retracción del coágulo en un plazo de 60 minutos. Una vez tomada la muestra, se colocó en hielo hasta llevarla a la centrifugación durante 15 minutos a 3500 rpm para separar por duplicado el suero en viales de 2 mL. Los sueros se almacenaron a -20 °C hasta su uso para determinar las concentraciones de glucosa, colesterol, triglicéridos y proteína total con un autoanalizador de sangre en fase líquida (EasyVet; KrontronLab, México). Para los electrolitos se siguió la metodología del equipo Electrolyte Analyzer (LW E60A, USA).

### **3.5. Análisis estadístico**

La información colectada se sometió a un análisis de varianza mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS (versión 9.4). Las variables de comportamiento productivo se analizaron aplicando un modelo de arreglo factorial 2<sup>2</sup> (sexo y MI) bajo un diseño completamente al azar (DCA), mientras que para cambios de PV, parámetros hematológicos y concentraciones de analitos se usó el mismo arreglo, pero incluyendo el día de muestreo como medición repetida en el tiempo. En el caso específico de las variables fisiológicas, el modelo utilizado fue un arreglo factorial 2 × 2 × 3 (sexo, MT y hora del día) bajo un DCA con mediciones repetidas en el tiempo (día de muestreo). Las medias se compararon mediante la opción LSMEAN a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

## IV. RESULTADOS

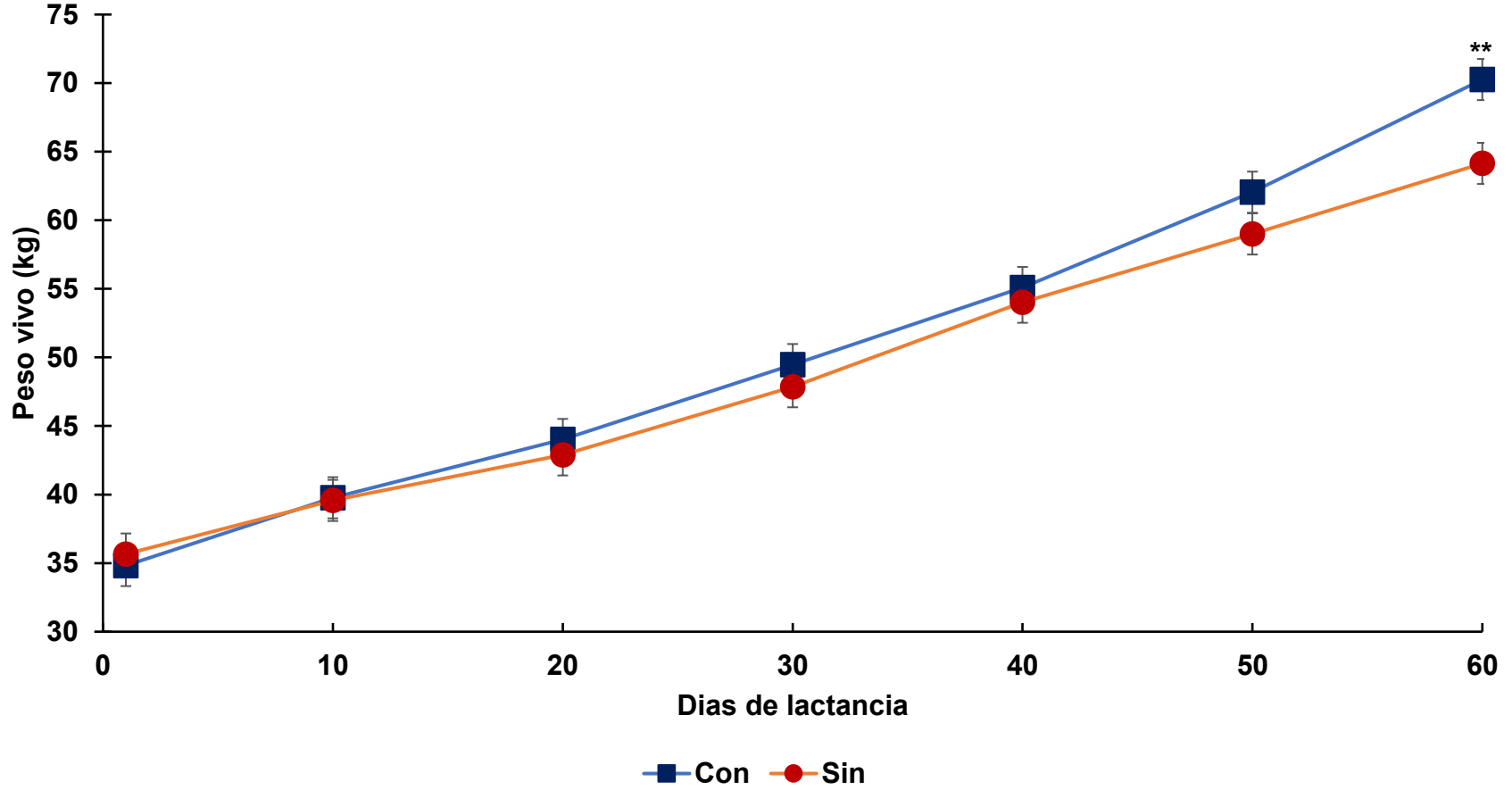
### 4.1. Comportamiento productivo

Solamente la interacción MI × día de muestreo afectó ( $P < 0.05$ ) el PV, observándose que los MI no causaron cambios en el PV durante los primeros 50 d, pero lo aumentaron en los últimos 10 d (Figura 2). El sexo no afectó ( $P > 0.05$ ) el PV de los terneros en el periodo predestete. Por otra parte, la interacción MI × sexo no afectó ( $P > 0.05$ ) las variables de comportamiento productivo (Cuadro 5). Independientemente del sexo, los terneros con MI aumentaron ( $P = 0.01$ ) la GDP, el consumo de alimento sólido y el peso al destete.

**Cuadro 4.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables (MI) en el crecimiento y consumo de dieta sólida de terneros y terneras Holstein durante el periodo de lactación.

Variables <sup>2</sup>	Minerales Inyectables <sup>1</sup>			Sexo (S)			Valores de P		
	Sin	Con	E.E. <sup>2</sup>	Hembras	Machos	E.E.	MI	S	MI×S
PN (kg)	35.66	34.82	0.71	33.91	36.57	0.67	0.42	0.01	0.24
PD (kg)	64.15	70.26	1.50	65.18	69.22	1.41	0.01	0.07	0.33
GDP (g/d)	0.474	0.590	0.02	0.521	0.544	0.02	< 0.01	0.17	0.48
CDS (g/d)	0.592	0.598	0.01	0.598	0.592	0.02	0.79	0.80	0.38

<sup>1</sup> Terneros inyectados con 0 (Sin) o 2 aplicaciones de minerales traza (Con), en las que cada aplicación contenía 60 mg de Zn, 10 mg de Mn 5 mg de Se y 15 mg de Cu. <sup>2</sup> Error estándar de la media. PN= Peso al nacimiento; PD= Peso al destete; GDP= Ganancia diaria de peso; CDS= Consumo de dieta sólida; EE= Error estándar.



**Figura 2.** Cambios en el peso vivo de los terneros Holstein por efecto de la suplementación de MI (con y sin) durante el período de lactación (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos).

## 4.2. Variables fisiológicas

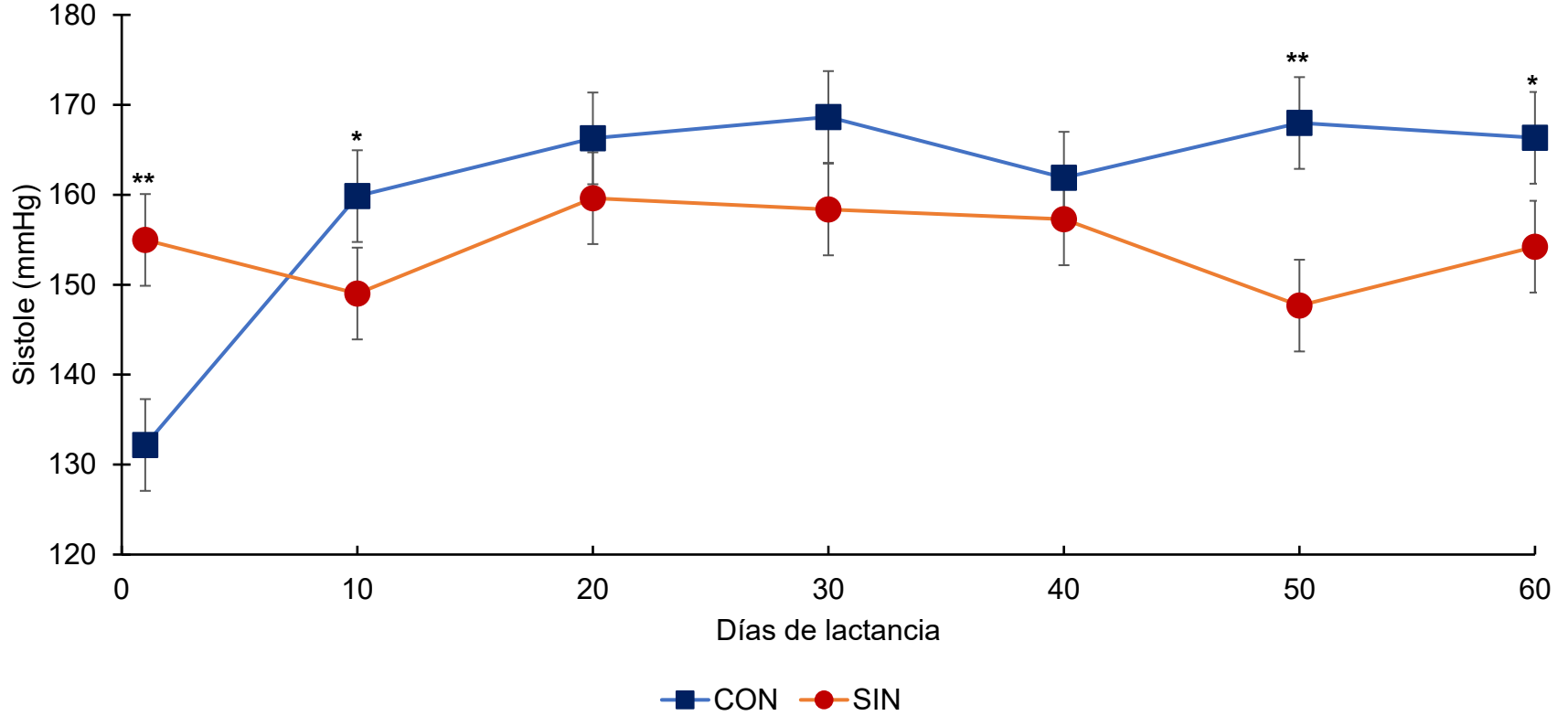
En el cuadro 6 se presenta el efecto de la suplementación de MI, sobre las variables fisiológicas de terneros y terneras Holstein. Las interacciones entre MI, sexo, día de muestreo y/o horario no afectaron ( $P > 0.05$ ) la TR, el nivel de oxigenación o el número de pulso. En general, la TR tendió ( $P = 0.07$ ) a disminuir por la administración de MI y fue mayor ( $P = 0.02$ ) en hembras que, en machos, mientras que el nivel de oxigenación y el número de pulso no variaron ( $P \geq 0.39$ ) debido a los MI o sexo. Respecto al efecto de día y horario de muestreo, ambos factores causaron variación ( $P = 0.01$ ) en el número de pulsos, pero no en el nivel de oxigenación ( $P \geq 0.28$ ). La TR solamente varió ( $P = 0.01$ ) debido al horario de muestreo. Por otra parte, la sístole fue afectada ( $P = 0.01$ ) solamente por la interacción MI x día de muestreo, sin cambio alguno debido al sexo ( $P = 0.16$ ) u horario de muestreo ( $P = 0.46$ ). La administración de MI redujo la presión sístole al inicio del experimento, pero luego la aumentó en los días 10, 50 y 60 de lactancia, con ningún cambio en el resto de los días (Figura 3). Las interacciones MI x horario de muestreo y MI x sexo x día de muestreo afectaron ( $P \leq 0.04$ ) tanto la presión diástole y la frecuencia cardíaca. La suplementación de MI redujo la presión diástole por la tarde (Figura 4) y la frecuencia cardíaca a medio día (Figura 5), pero no promovió cambio alguno en el resto de los horarios. Basado en el periodo de lactación completo, la administración de MI en hembras aumentó la presión diástole en los días 10 y 40, y la redujo al día 20; pero en machos solamente la aumentó los días 40 y 50 sin cambio en los otros días (Figura 6). Por su parte, la frecuencia cardíaca en respuesta a los MI varió solamente en los días 20 y 50 para machos y hembras, respectivamente, aumentándola en ambos casos (Figura 7).

**Cuadro 5.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables (MI) en las variables fisiológicas de terneros y terneras Holstein durante el periodo de lactación.

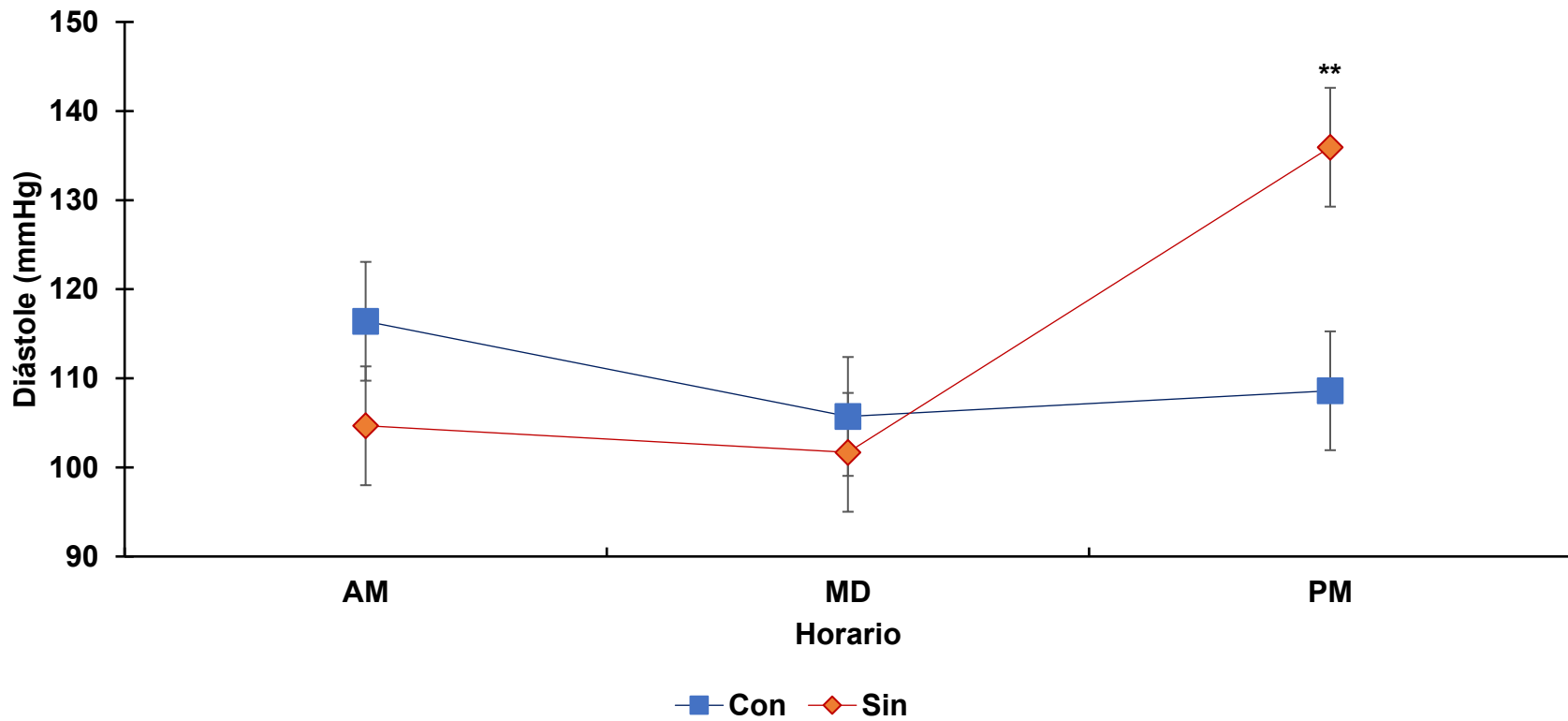
Variables	Minerales Inyectables <sup>1</sup>			Sexo (S)			Valores P <sup>3</sup>								
	Sin	Con	EE <sup>2</sup>	Hembra	Macho	EE	MI	S	D <sup>2</sup>	H <sup>2</sup>	MI×S	MI×D	MI×H	S×D	MI×S×D
Temperatura rectal (°C)	38.45	38.33	0.04	38.47	38.31	0.05	0.07	0.02	0.78	0.01	0.90	0.15	0.17	0.07	0.18
Oxigenación (%)	98.67	98.77	0.15	98.81	98.63	0.18	0.66	0.47	0.28	0.91	0.98	0.54	0.58	0.42	0.26
Pulso (lpm)	76.20	73.37	2.02	74.47	75.10	2.52	0.39	0.84	0.01	0.01	0.66	0.53	0.74	0.86	0.84
Sístole (mmHg)	154.45	160.45	1.97	155.12	159.79	2.46	0.08	0.16	0.01	0.46	0.19	0.01	0.46	0.82	0.28
Diástole (mmHg)	114.10	110.24	3.41	116.47	107.87	4.25	0.49	0.14	0.01	0.06	0.14	0.01	0.04	0.01	0.01
FC <sup>2</sup> (lpm)	105.90	104.85	2.85	105.80	104.14	3.56	0.95	0.72	0.01	0.48	0.18	0.53	0.02	0.18	0.01

<sup>1</sup> Animales inyectados con 0 (Sin) o 2 aplicaciones de minerales traza (Con), en las que cada aplicación contenía 60 mg de Zn, 10 mg de Mn5 mg de Se y 15 mg de Cu.

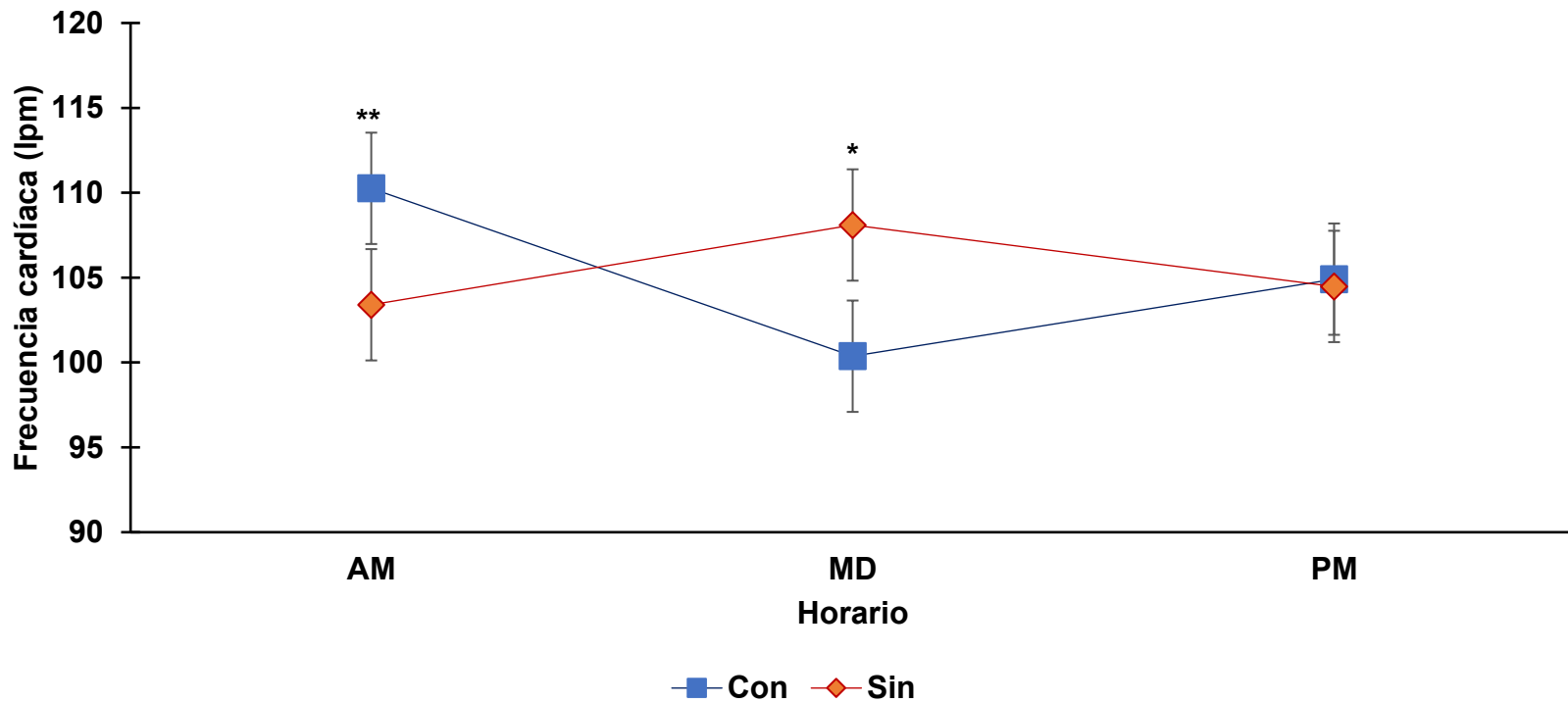
<sup>2</sup> EE= Error estándar; FC= Frecuencia cardiaca; D= Día de muestreo; H= Hora de muestreo.



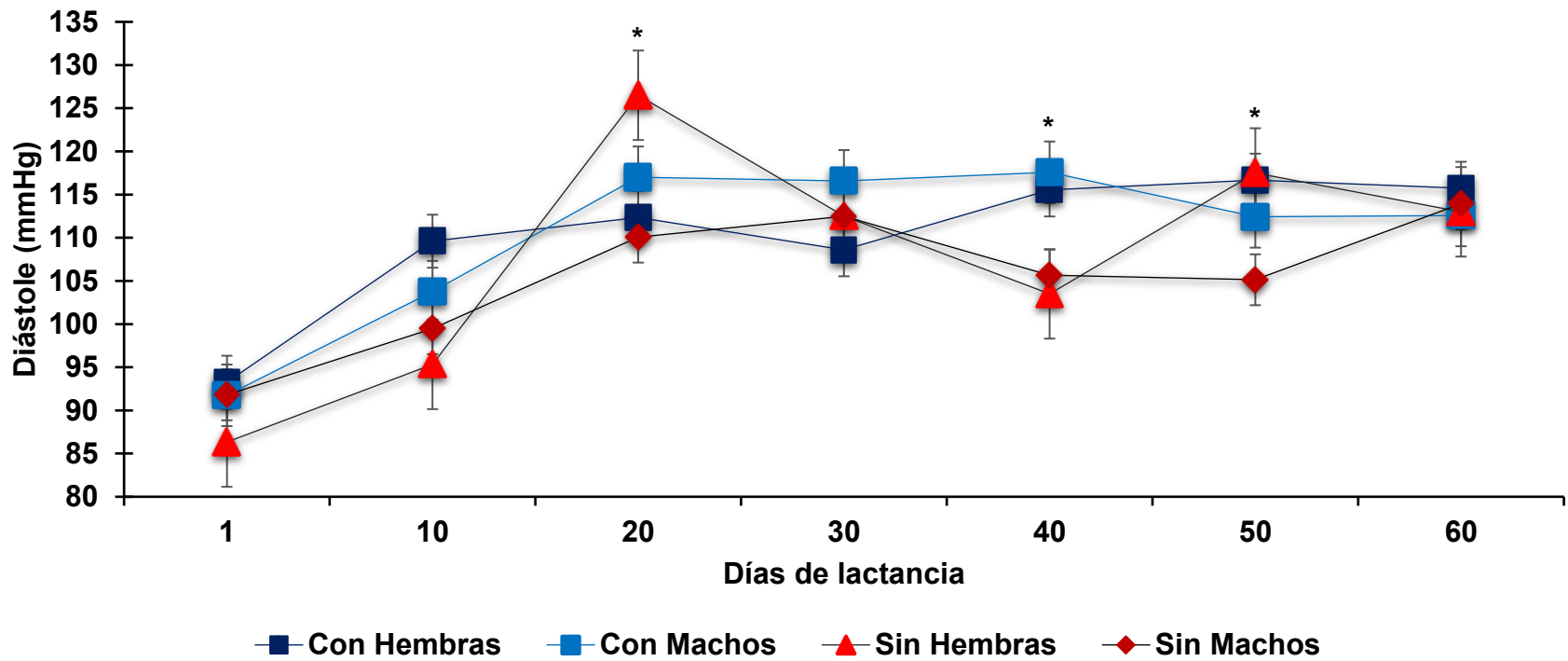
**Figura 3.** Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables (con o sin) sobre la presión sistólica de terneros y terneras Holstein durante el periodo de lactación (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos).



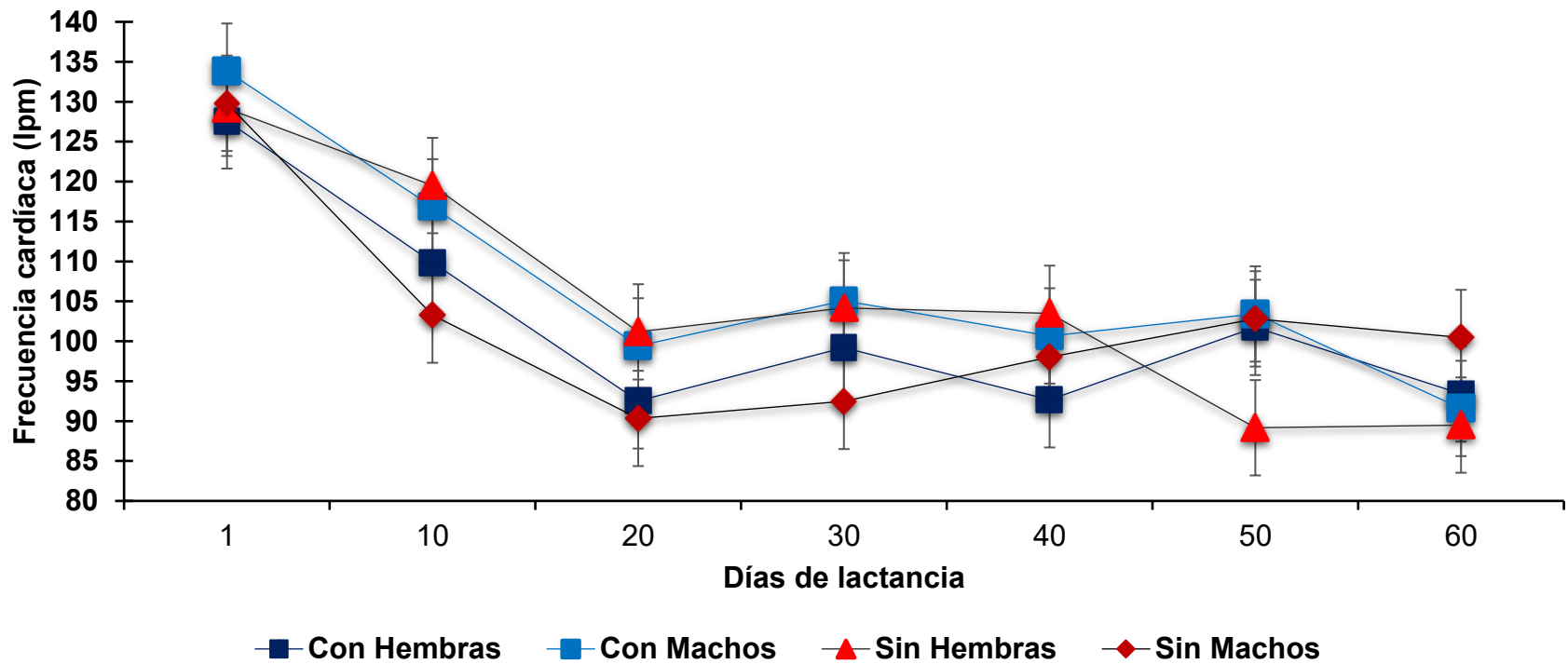
**Figura 4.** Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables (con y sin) sobre la presión diastólica de terneros y terneras Holstein a diferentes horarios del día (AM= Mañana, MD= Medio día; PM= Tarde); \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



**Figura 5.** Frecuencia cardíaca en terneros Holstein suplementados con y sin MI a lo largo del día durante el periodo de lactación (AM= Mañana, MD= Medio día, PM= Tarde); \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



**Figura 6.** Presión diastólica de terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



**Figura 7.** Frecuencia cardíaca en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.

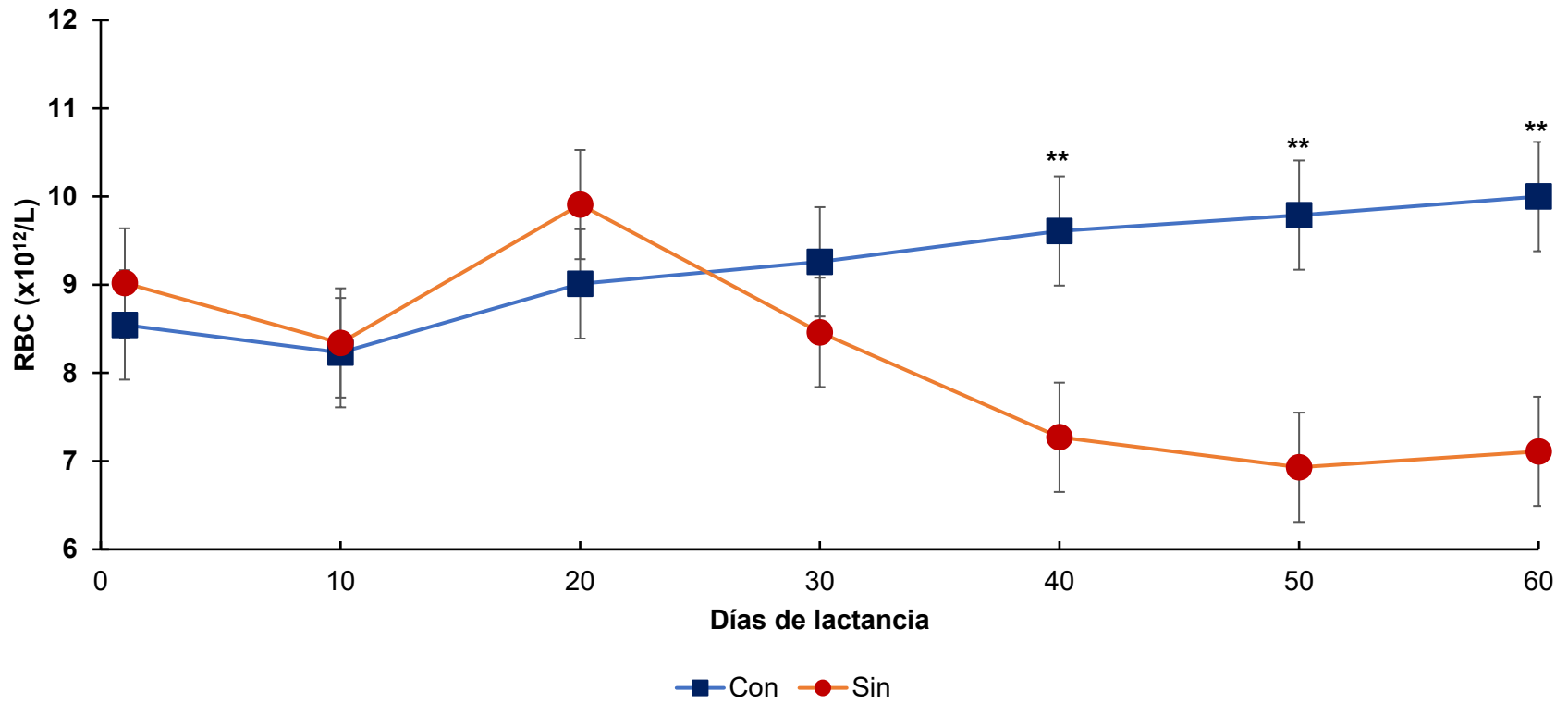
### 4.3. Perfiles hematológicos

En el Cuadro 7 se presentan los resultados del efecto de la suplementación de MI sobre los perfiles hematológicos de terneros y terneras Holstein durante el periodo de lactación. Las interacciones MI x sexo x día de muestreo, así como MI x sexo, no afectaron ( $P \geq 0.06$ ) ninguno de los parámetros hematológicos, mientras que las interacciones MI x día de muestreo y sexo x día de muestreo tampoco modificaron ( $P \geq 0.06$ ) los valores de conteos de glóbulos blancos y plaquetas, hemoglobina, amplitud de distribución eritrocitaria y de plaquetas, y plaquetocrito. Estos mismos parámetros hematológicos tampoco fueron afectados ( $P \geq 0.08$ ) por la suplementación de MI o sexo, mientras que el día de muestreo ( $P \leq 0.05$ ) provocó variación en la mayoría de esas variables (excepto en conteo de glóbulos blancos como  $P = 0.77$ ). Nota que el número de glóbulos blancos tendió ( $P = 0.08$ ) a incrementar por la administración de MI. Por otra parte, la interacción MI x D afectó ( $P = 0.01$ ) solamente al conteo de glóbulos rojos, volumen corpuscular medio, hemoglobina corpuscular media, concentración media de hemoglobina corpuscular y volumen plaquetario medio. Se observó que el conteo de glóbulos rojos incrementó (Figura 8) al mismo tiempo que disminuyó el volumen corpuscular medio (Figura 9), hemoglobina corpuscular media (Figura 10) y concentración media de hemoglobina corpuscular (Figura 11) por efecto de la administración de MI entre los días 40 y 60 de lactación, sin embargo, no hubo cambios atribuidos a MI en estas variables en los días 0, 10, 20 y 30 de lactancia. El volumen plaquetario medio en el grupo tratado con MI fue mayor al día 10, pero más bajo al día 20 y 30, comparado con el grupo testigo (Figura 12). Finalmente, la interacción sexo x días de muestreo afectó ( $P \leq 0.05$ ) solamente al conteo de glóbulos rojos (Figura 13) y hematocrito (Figura 14), observándose que los valores de estas variables fueron mayores en hembras que en machos el día 0 de lactancia; misma situación se presentó al día 30 para el caso particular de conteo de glóbulos rojos.

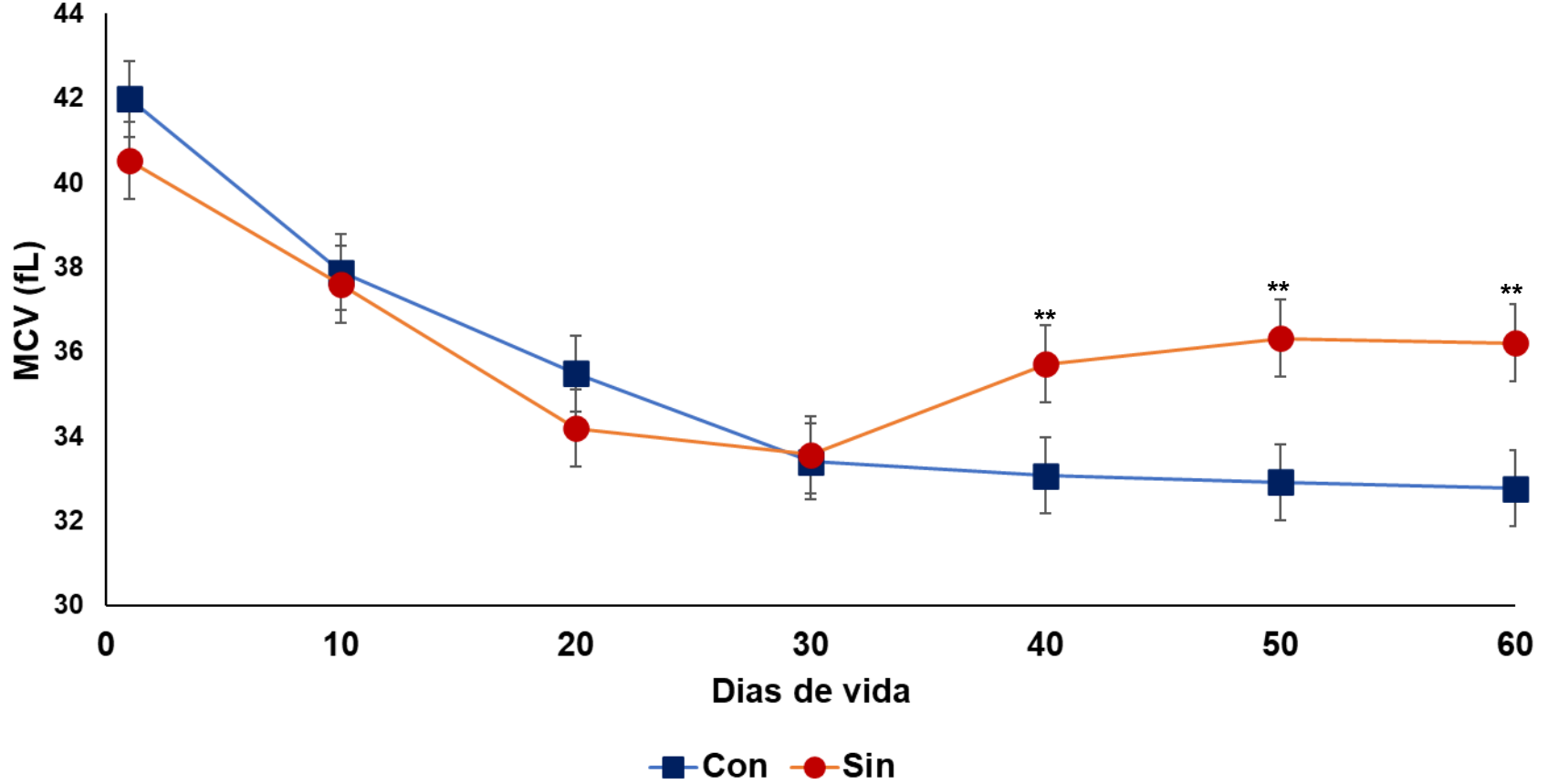
**Cuadro 6.** Efecto de la suplementación de minerales traza inyectables en los perfiles hematológicos durante el periodo de lactación de terneros y terneras Holstein.

Variable	Minerales Inyectables <sup>1</sup>			Sexo (S)			Valores de P						
	Con	Sin	E.E	Hembra	Machos	E.E.	MI	S	D	MI×S	MI×D	S×D	MI×S×D
WBC (10 <sup>9</sup> /L)	10.07	8.20	0.62	9.10	9.17	0.56	0.08	0.92	0.77	0.76	0.84	0.85	0.88
RBC (10 <sup>12</sup> /L)	9.21	8.01	0.57	8.76	8.46	0.45	0.12	0.69	0.79	0.53	0.01	0.03	0.06
HGB (g/dL)	10.80	10.23	0.51	10.89	10.15	0.64	0.50	0.38	0.05	0.66	0.91	0.44	0.10
HCT (%)	28.78	32.45	1.95	31.17	30.06	2.43	0.26	0.72	0.01	0.52	0.07	0.05	0.06
MCV (fL)	35.35	36.29	0.62	35.90	35.74	0.77	0.36	0.87	< 0.01	0.71	0.01	0.37	0.27
MCH (g/dL)	11.70	14.69	0.96	13.93	12.46	0.77	0.03	0.25	0.09	0.33	0.01	0.07	0.08
MCHC (pg)	33.31	40.33	2.67	38.69	34.95	2.14	0.06	0.29	0.01	0.31	0.01	0.06	0.09
RDW (%)	18.36	18.65	0.42	18.54	18.47	0.52	0.68	0.92	< 0.01	0.18	0.81	0.37	0.65
PLT (10 <sup>9</sup> /L)	933.38	768.03	85.33	805.73	896.12	60.79	0.14	0.40	0.01	0.30	0.43	0.45	0.60
MPV (fL)	4.30	4.28	0.05	4.36	4.22	0.04	0.77	0.09	0.01	0.57	0.01	0.45	0.54
PDW	16.01	15.99	0.05	16.06	15.94	0.07	0.76	0.18	< 0.01	0.06	0.12	0.93	0.27
PCT	0.36	0.31	0.02	0.32	0.36	0.01	0.15	0.28	0.01	0.88	0.09	0.10	0.28

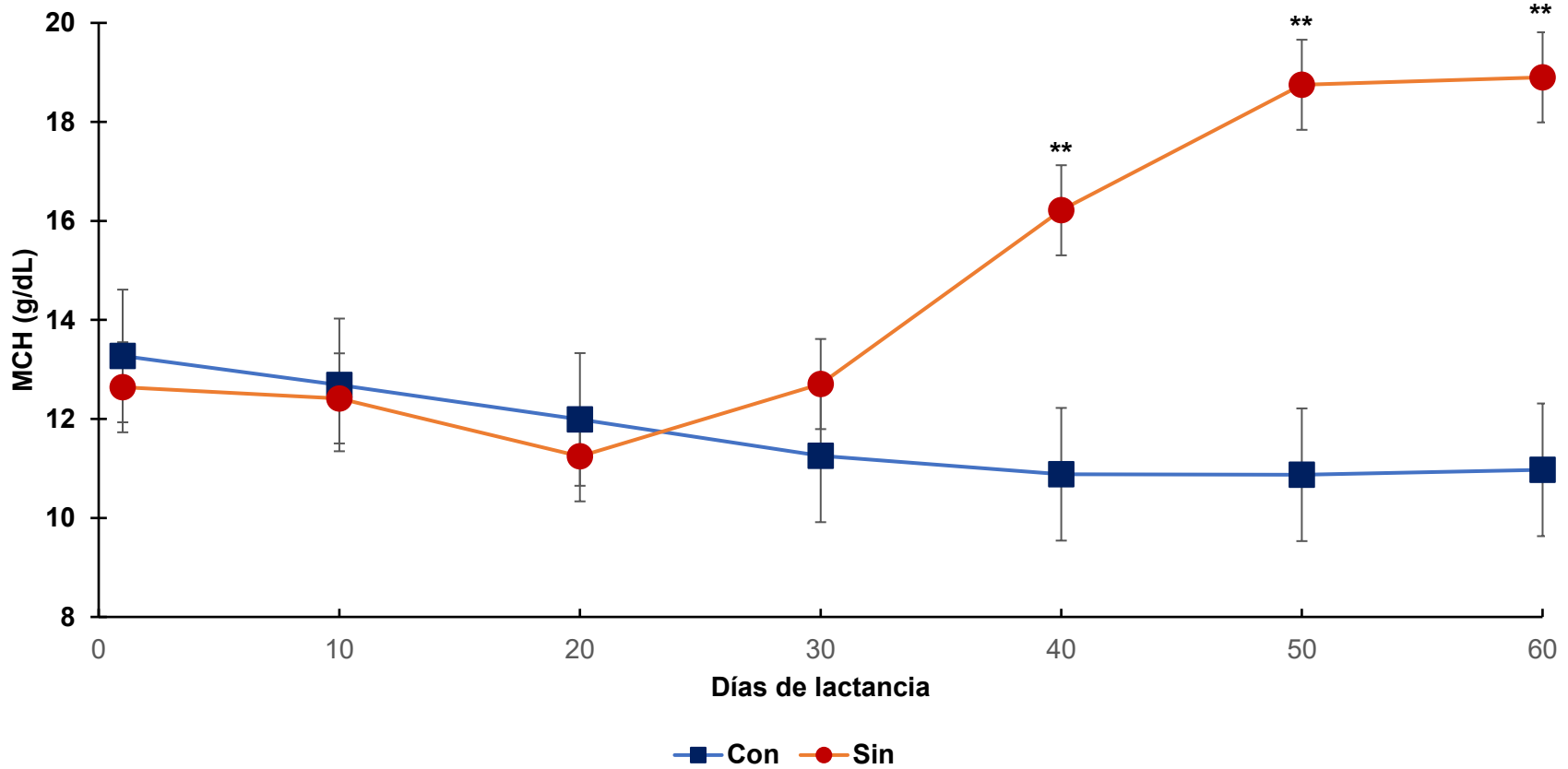
Terneros suplementados con 0 aplicaciones de minerales traza (Sin) o 2 aplicaciones (Con) de minerales traza (Con), en los que cada aplicación contenía 60 mg de Zn, 10 mg de Mn, 5 mg de Se y 15 mg de Cu. <sup>2</sup> Error estándar de la media.



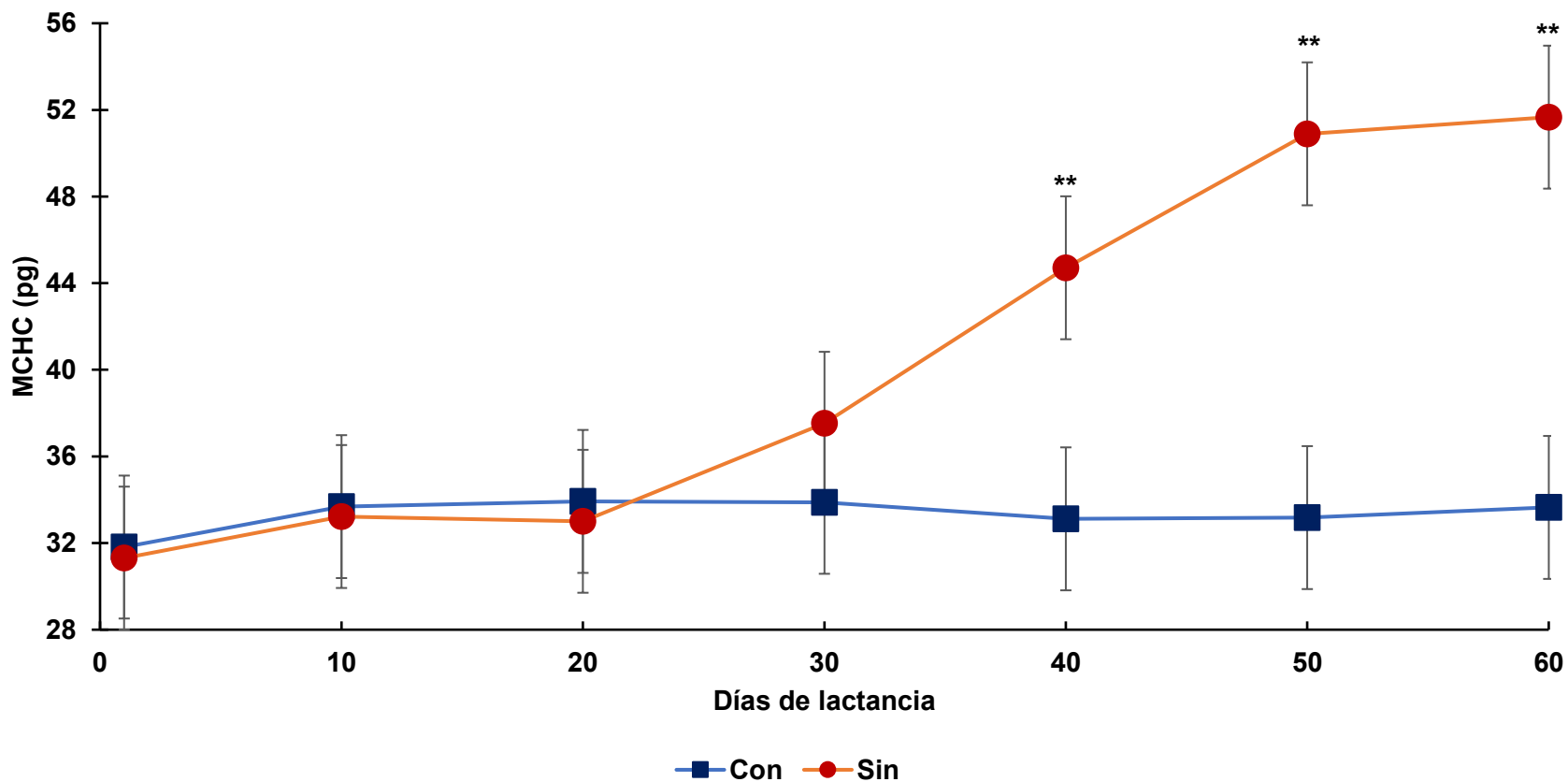
**Figura 8.** Recuento de glóbulos rojos en terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



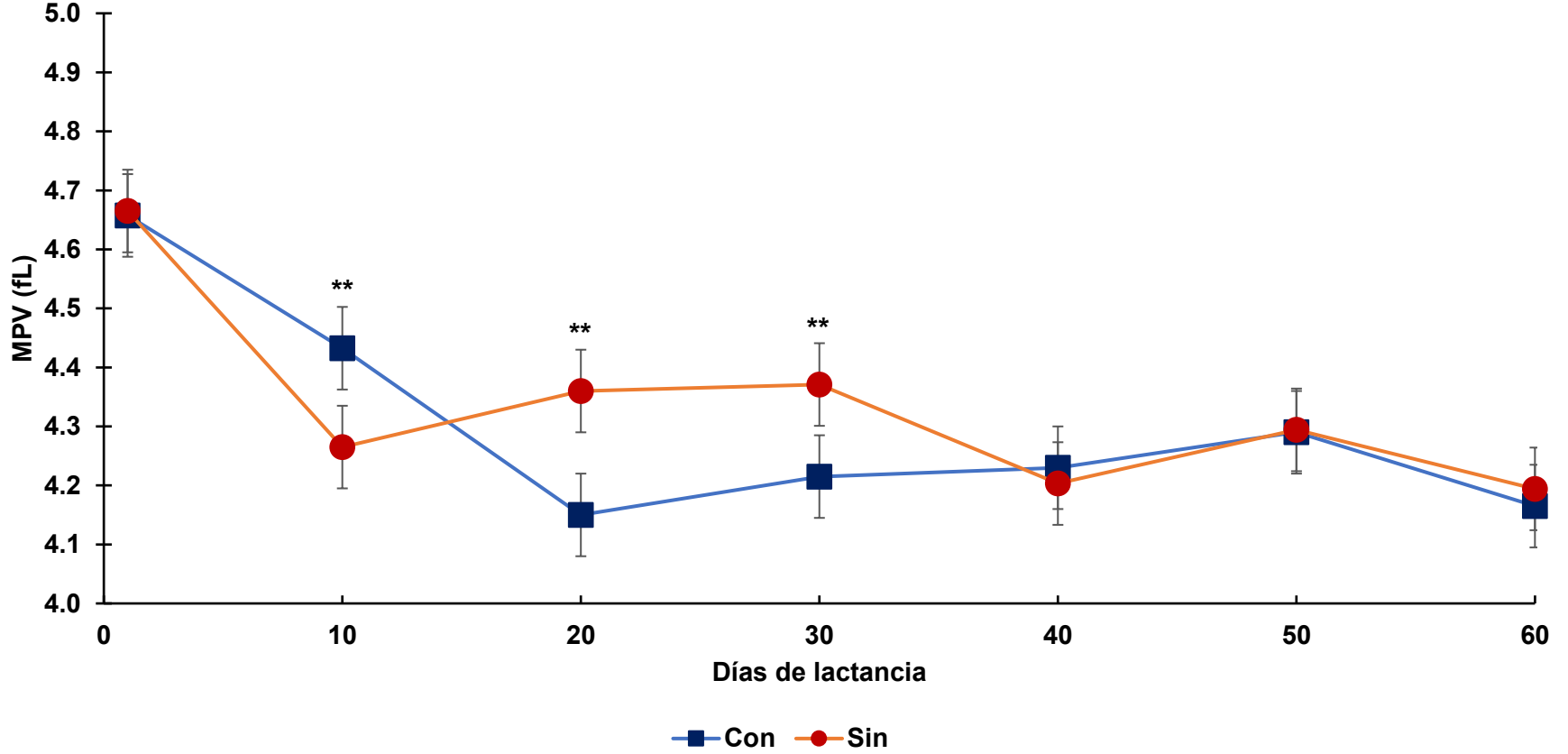
**Figura 9.** Concentración del volumen corpuscular medio en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



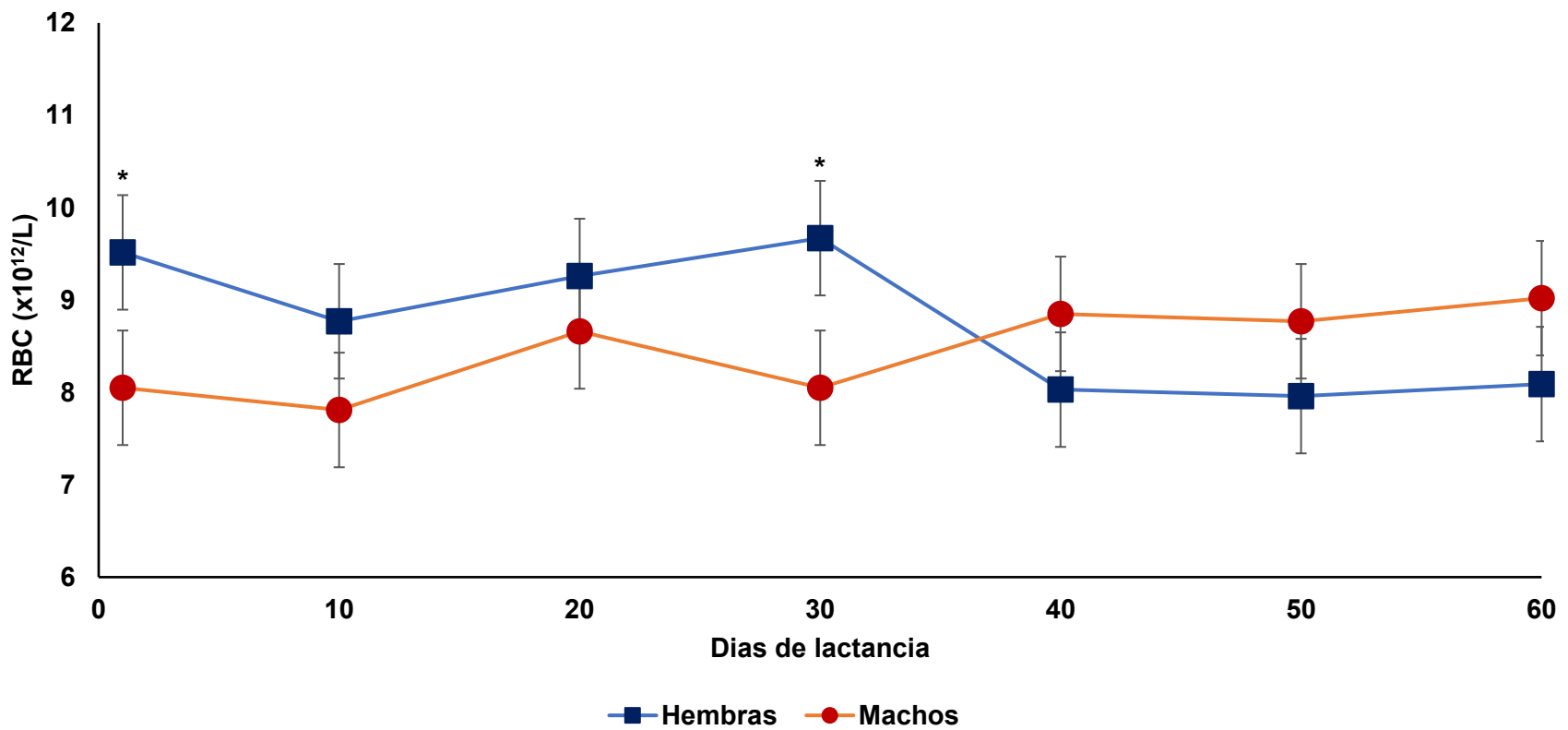
**Figura 10.** Concentración media de hemoglobina corpuscular en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



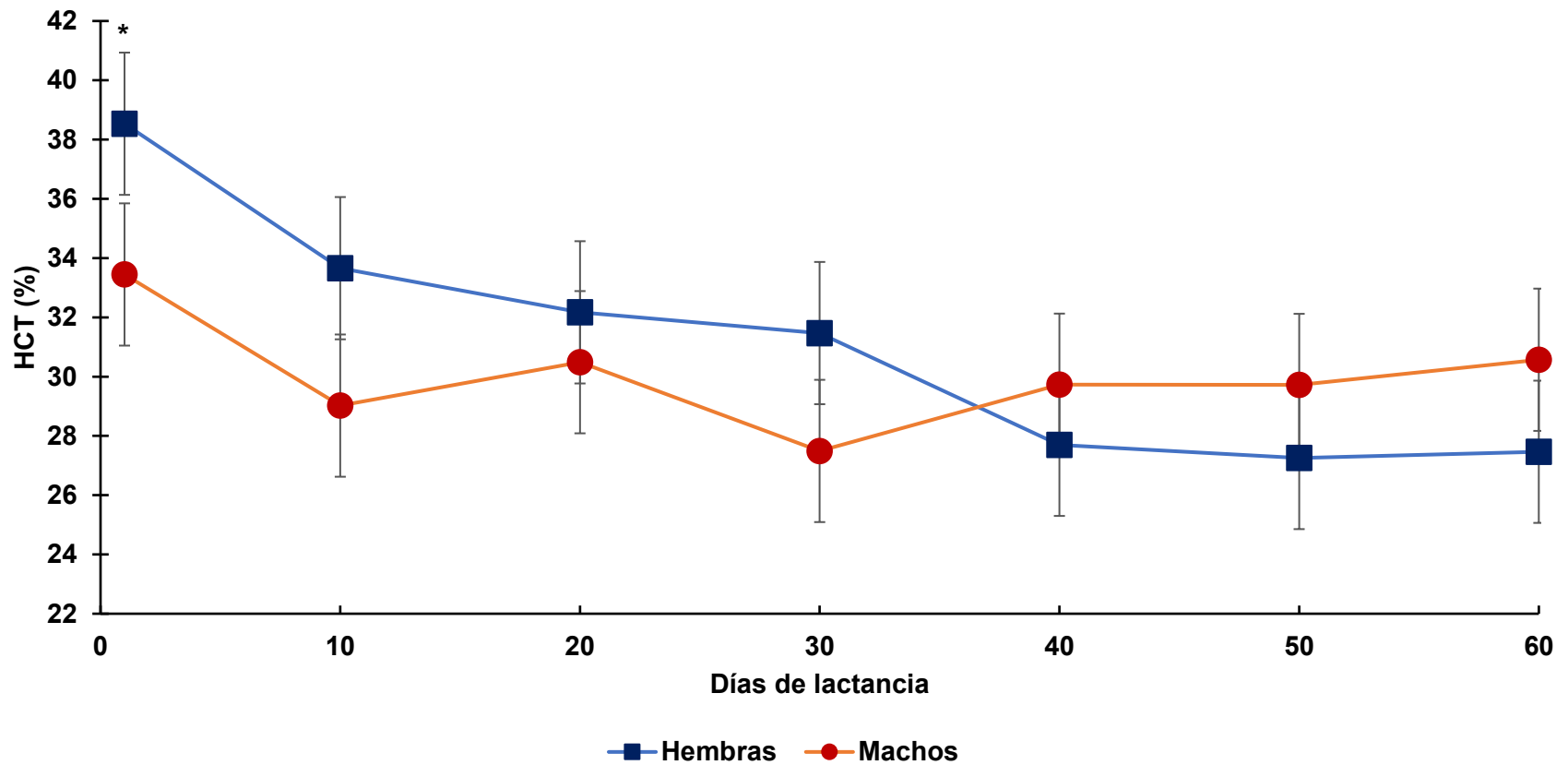
**Figura 11.** Concentración de hemoglobina corpuscular media en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



**Figura 12.** Concentración del volumen plaquetario medio en terneros Holstein suplementados con y sin doble suplementación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



**Figura 13.** Recuento de glóbulos rojos en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



**Figura 14.** Recuento de hematocritos en terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza inyectables durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.

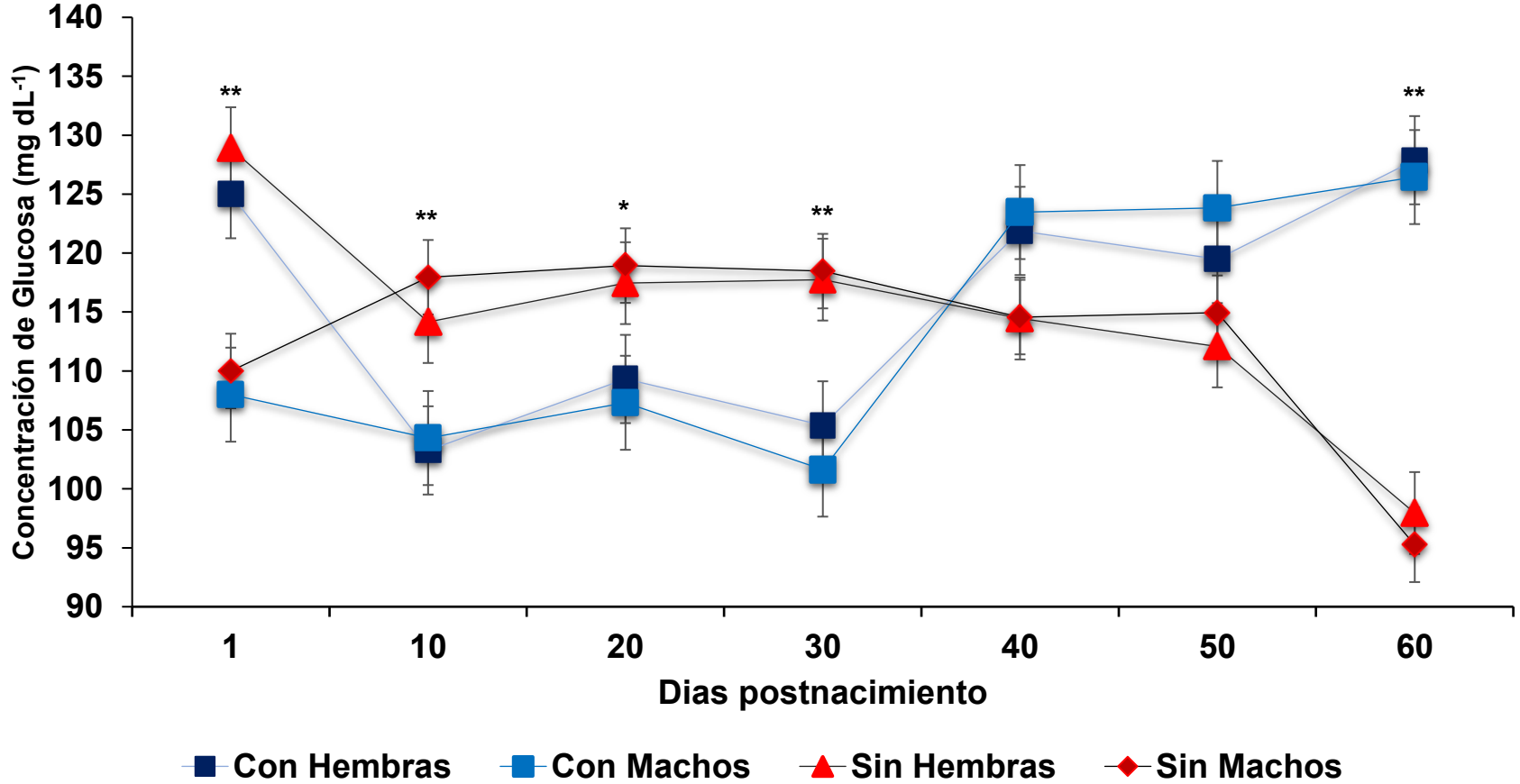
#### 4.4 Evaluación de metabolitos y electrolitos sanguíneos

Los resultados de concentración de analitos séricos se presentan en Tabla 8. Las concentraciones séricas de colesterol, triglicéridos y proteína total no variaron por efecto ( $P \geq 0.06$ ) de alguna interacción entre MI, sexo y día de muestro, o bien por efecto de sexo ( $P \geq 0.21$ ) como factor principal. En general, la suplementación de MI aumentó ( $P = 0.01$ ) la concentración de triglicéridos, sin promover cambios ( $P \geq 0.38$ ) en colesterol y proteína total. Particularmente, la concentración de glucosa se modificó ( $P = 0.01$ ) por efecto de la interacción MI x sexo x día de muestreo, la cual fue más baja en los primeros 30 d y luego más alta en los últimos 30 d de lactancia por efecto de la administración de MI, tanto en machos como en hembras (Figura 15). Similarmente, las concentraciones de todos los electrólitos variaron ( $P \leq 0.04$ ) por la interacción triple. La suplementación de MI no cambió las concentraciones de sodio entre el día 0 y 40 de lactación en machos y hembras, mientras que al día 50 las aumentó solamente en machos y al día 60 en ambos sexos (Figura 16). Para potasio, los machos inyectados con MI tuvieron mayor concentración los días 0 y 60 de lactancia que los machos no tratados, mientras que el MI en hembras solamente promovió un aumento el día 10 y una disminución el día 30 de lactancia en la concentración de este electrolito (Figura 17); en el resto de los días, no se observaron variaciones dentro de sexo debido a los MI en las concentraciones de potasio. Finalmente, la suplementación de MI solo provocó cambios en hembras sobre las concentraciones de cloro, específicamente el día 30 de lactancia las disminuyó (Figura 18).

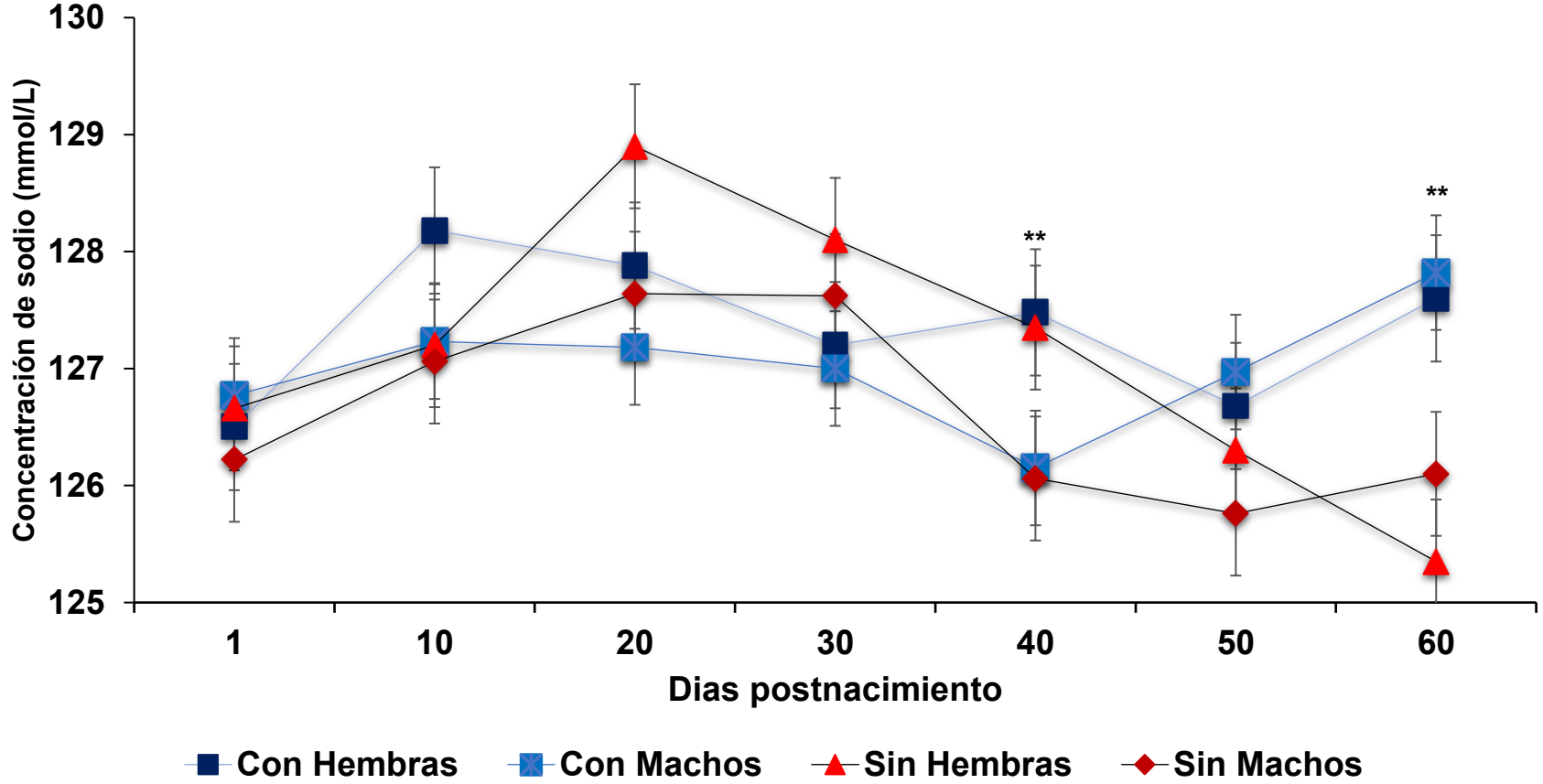
**Cuadro 7.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre los metabolitos sanguíneos de terneros Holstein durante el periodo de lactación.

Variables	Minerales Inyectables <sup>1</sup>		EEM <sup>2</sup>	Sexo		EEM <sup>2</sup>	Valores de P						
	Con	Sin		Hembras	Machos		MI	S	D	MI × S	MI × D	S × D	MI × S × D
<i>Metabolitos sanguíneos</i>													
Glucosa (mg dL <sup>-1</sup> )	112.49	109.34	3.18	108.98	112.85	2.48	0.45	0.35	< 0.01	0.27	0.02	0.18	0.03
Colesterol (mg dL <sup>-1</sup> )	119.52	118.11	7.45	111.02	126.61	9.22	0.90	0.21	< 0.01	0.99	0.79	0.74	0.44
Triglicéridos (mg dL <sup>-1</sup> )	27.15	17.20	2.09	21.76	22.59	2.59	0.01	0.82	< 0.01	0.67	0.93	0.06	0.19
Proteína total (mg dL <sup>-1</sup> )	7.31	6.11	0.82	7.18	7.24	1.06	0.38	0.49	0.62	0.57	0.86	0.74	0.81
<i>Electrolitos sanguíneos</i>													
Sodio (mmol)	127.05	127.10	0.29	127.32	126.83	0.37	0.90	0.33	< 0.01	0.37	< 0.01	< 0.01	0.01
Potasio (mmol)	4.56	4.52	0.05	4.50	4.57	0.06	0.60	0.41	0.01	0.68	0.03	0.01	0.01
Cloro (mmol)	100.91	100.68	0.36	100.85	100.73	0.45	0.70	0.83	0.01	0.60	0.01	0.38	0.04

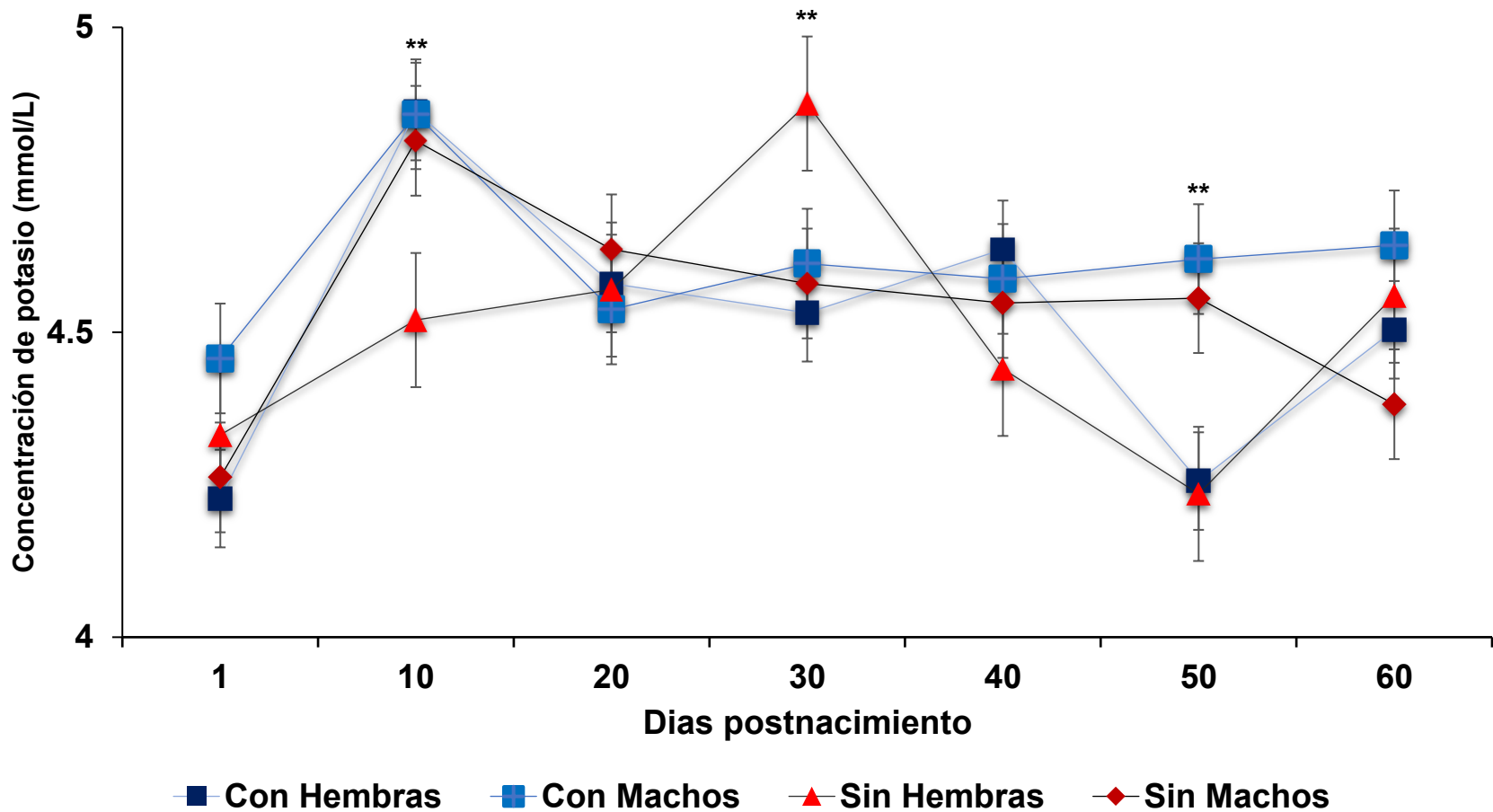
<sup>1</sup> Terneros suplementados con 0 aplicaciones de minerales traza (Sin) o 2 aplicaciones (Con) de minerales traza (Con), en las que cada aplicación contenía 60 mg de Zn, 10 mg de Mn, 5 mg de Se y 15 mg de Cu. <sup>2</sup> Error estándar de la media.



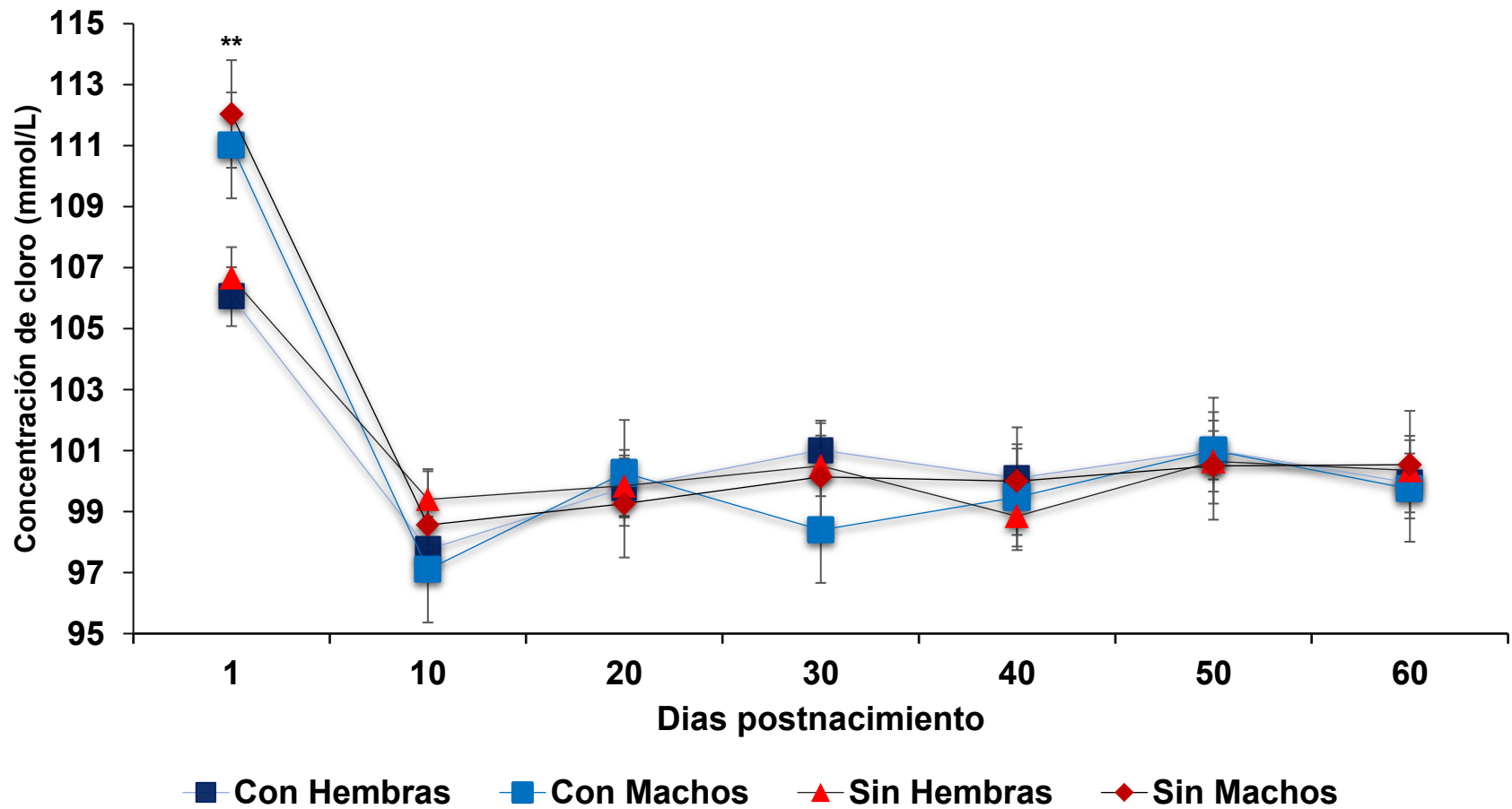
**Figura 15.** Concentración de glucosa en suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein suplementados con y sin doble aplicación de minerales traza durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



**Figura 16.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito sodio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación; \*P<0.05, \*\*P<0.01 y P>0.05 con ausencia de asteriscos.



**Figura 17.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito potasio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.



**Figura 18.** Efecto de la suplementación con dos aplicaciones de minerales traza inyectables sobre la concentración relativa del electrolito potasio en el suero sanguíneo de terneras y terneros Holstein durante el periodo de lactación; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  y  $P > 0.05$  con ausencia de asteriscos.

## V. DISCUSIÓN

### 5.1. Efecto de la suplementación mineral en el crecimiento de terneros

Los terneros Holstein suplementados con dos aplicaciones de MI presentaron un mayor crecimiento que los terneros sin suplementación de MI. Previamente Teixeira et al. (2014) y Bittar et al. (2018) propusieron que una suplementación inyectable de minerales traza que contuviera una fuente de Cu, Se, Zn o Mn pudieran aumentar las concentraciones hepáticas de Cu y Se al promover su síntesis a partir de la dieta o por la misma fuente parenteral, durante al menos 15 días después de la inyección. Esto activaría mecanismos enzimáticos elevando el Zn y Mn plasmáticos durante varias horas en terneros destetados. Por lo tanto, la interacción entre la suplementación mediante doble aplicación con MI y el metabolismo de la dieta líquida y sólida podría haber mejorado la asimilación de los nutrientes, lo que habría potenciado el crecimiento de los terneros. Este beneficio, a su vez, podría estar relacionado con la forma de aplicación y el contenido mineral de la fórmula aplicada. Bittar et al. (2018) describieron que el método inyectable de minerales, en primer lugar, ha demostrado mejorar el sistema circular de minerales al evitar su paso por el rumen o, específicamente, el abomaso, lo que evita interacciones antagónicas que pueden reducir la capacidad de absorción al competir por la absorción de macroelementos a nivel ruminal. Debido a este paso metabólico adelantado, se ha caracterizado que la suplementación de minerales a través de un medio inyectable beneficia sistemáticamente procesos fisiológicos específicos como puede el sistema antioxidante del cuerpo, la densidad mineral ósea y el crecimiento muscular (Bittar et al., 2018).

De acuerdo con Bordignon et al. (2019), la suplementación inyectable puede mejorar el crecimiento incluso en ausencia de insuficiencia dietética. En un estudio dirigido por los mismos autores, terneros en periodo de destete recibieron dos inyecciones de una solución mineral con Cu, Zn, Mn y Se, enriquecida con vitaminas A y E, con resultados positivos en el grupo tratado, donde los terneros mostraron una mayor ganancia de peso corporal en comparación con el grupo control. Cabe destacar

que ambos grupos de terneros presentaban un nivel mineral basal, y el efecto se observó a pesar de que las concentraciones iniciales de minerales séricos no eran deficientes, lo que sugiere que se debe a un factor fisiológico más allá de la suficiencia dietética.

No obstante, nuestros resultados son poco comparables con diversos estudios, que informaron que una suplementación mineral mediante MI no mostró cambios positivos en el crecimiento en terneros lactantes o posdestetados (Bordignon et al., 2019; Nennich et al., 2010; Vedovatto et al., 2020). Un estudio similar en terneros lactantes Holstein conducido por Teixeira et al. (2014), en donde utilizaron una programación de aplicaciones similares, junto con las dosis del presente estudio, observaron si bien una mayor capacidad antioxidante total en los terneros, la ganancia diaria de peso ni el peso al destete no se incrementaron significativamente. En otro estudio similar, una doble aplicación de MI durante el periodo de lactación en terneros mostró un incremento de la capacidad antioxidante y, además, de la ganancia diaria de peso. Los autores concluyeron que la suplementación MI pudiera tener efectos positivos en variables productivas dependiendo del estatus mineral o nutrimental de los terneros, lo cual involucra el aporte nutrimental de la dieta (Nennich et al., 2010). Por lo tanto, nuestros resultados indican que el efecto promotor del crecimiento podría depender de factores relacionados con el nivel basal adecuado. Cuando el nivel de minerales no es limitante, la suplementación adicional, ya sea inyectable u oral, no se traduce en una mejora del rendimiento del crecimiento. Varios estudios afirman explícitamente que la ausencia de respuesta al crecimiento probablemente se deba a que los terneros no presentan deficiencia de minerales traza, como lo demuestran las concentraciones de minerales en sangre y hígado dentro de los rangos de referencia durante los períodos de estudio. (Bittar et al., 2018; Hernandez et al., 2023; Lim et al., 2024).

Aunque no siempre se ha reportado la medición o cuantificación directa de la ingesta de dieta sólida, nuestros resultados pudieran estar relacionados a un mejor rendimiento del crecimiento y una mayor ganancia diaria de peso por una mejor utilización de nutrientes, debido al efecto significativo en el aumento de la ingesta de

alimento sólido durante la lactación (Bordignon et al., 2019). De acuerdo con Bicalho et al. (2014) y Palomares et al. (2016), los minerales traza inyectables guardan una estrecha relación con la ingesta de sólidos, ya que mejoran la salud y el sistema inmune. No obstante, sus descripciones fueron sugerencias de aplicabilidad, ya que sus observaciones se centraron en la reducción de diarreas y otitis tras la administración de dos inyecciones de minerales similares a los del presente trabajo. Sin embargo, otros autores no han encontrado una relación significativa entre el uso de minerales inyectables que contengan Cu, Se, Zn o Mg durante la lactancia y un mayor consumo de dieta sólida en la iniciación (Bittar et al., 2018; Bordignon et al., 2019; Nennich et al., 2010).

Por lo tanto, teorizamos que la suplementación inyectable con MI en terneros lecheros aumenta rápidamente el estado mineral y refuerza la función inmunitaria, lo que puede contribuir a una mejor salud y, potencialmente, a mejores resultados de crecimiento. Sin embargo, la evidencia directa sobre un mayor consumo de la dieta de inicio y el peso al destete durante el período de lactancia es limitada y contradictoria en los párrafos previos descritos. Los principales beneficios del MI parecen estar relacionados con una mejor salud y un mejor estado mineral, lo que, indirectamente, puede favorecer el crecimiento y el rendimiento cuando el estatus mineral al nacer es deficiente. Por lo cual, se requiere más investigación para dilucidar el mecanismo o factor que explique el impacto del MI en terneros en función de su estatus mineral al nacer.

## **5.2. Efectos de la suplementación mineral en la respuesta fisiológica**

Se ha demostrado que la suplementación inyectable de minerales traza en terneros lecheros, que a menudo contiene Zn, Cu, Mn o Se, aumentan directa o indirectamente las concentraciones hepáticas de Cu y Se durante al menos 15 días, elevando las concentraciones plasmáticas de Zn y Mn durante varias horas tras la administración (Teixeira et al., 2014). Esto tiene un impacto inmediato en las variables fisiológicas de monitoreo de la salud, como la frecuencia y los ciclos cardíacos. De acuerdo con Glombowsky et al. (2018), la suplementación con MI se asocia con un aumento de los niveles séricos de glucosa en los terneros, lo que puede indicar estrés

fisiológico y posibles alteraciones hepáticas relacionadas con cantidades excesivas de uno o más minerales al momento de su ingreso al sistema (Glombowsky, Aleksandro S. da Silva, et al., 2018). Se sabe que este aumento de glucosa está asociado con la respuesta fisiológica ante un aumento de la presión arterial en los mamíferos, debido a la mayor actividad del sistema nervioso simpático. Adicionalmente, algunos estudios han demostrado que suplementaciones con minerales, tanto orales como inyectables, de Cu y Zn pueden influir en el tono vascular y aumentar la presión arterial (Bittar et al., 2018; Glombowsky, Aleksandro S. da Silva, et al., 2018). Sin embargo, en lo que nosotros concierne, existen pocos datos reportados sobre el uso de la medición directa de la presión sistólica y diastólica, por lo que nuestros resultados observados en la concentración de glucosa en los terneros suplementados con las dos aplicaciones de MI pudiera conducir a un aumento de la presión arterial durante la mañana en el periodo de lactancia (Glombowsky, Aleksandro S. da Silva, et al., 2018).

Por lo tanto, la glucosa sérica tendría un papel fundamental en la señalización y en el aumento de la presión arterial. No obstante, cabe resaltar que el efecto de la glucosa sobre la presión arterial no está bien documentado en los resultados de modelos de animales de producción; sin embargo, la ingesta alta de glucosa en otros mamíferos se ha relacionado con un aumento de la presión arterial (Batistel et al., 2016a; Blum et al., 2005). El impacto de la glucosa en el equilibrio antioxidante y en los oligoelementos es complejo, ya que el metabolismo de la glucosa y los sistemas antioxidantes están interrelacionados y los oligoelementos son componentes cruciales de estos sistemas (Glombowsky, Aleksandro S. da Silva, et al., 2018; Pogge et al., 2012; Springman et al., 2018). Por lo tanto, la evidencia directa en terneros respecto de la glucosa y la presión arterial es limitada; los vínculos fisiológicos generales sugieren una posible interacción, en la que un estado mineral adecuado podría desempeñar un papel protector frente a los cambios vasculares relacionados con la glucosa (Palomares, 2022).

En cuanto a la reducción de la temperatura rectal en terneros suplementados con minerales traza inyectables, existen pocos estudios que hayan reportado cambios en la temperatura rectal durante ensayos con minerales. Jacometo et al. (2015)

reportaron que terneros suplementados con minerales inorgánicos presentaron una temperatura rectal más alta que los que consumieron fuentes orgánicas, por lo que los autores concluyeron que el calostro, la leche, la dieta sólida y posibles suplementos con aporte de minerales pudieran generar una respuesta inflamatoria transitoria. Además, los autores postularon que mientras no se supere el umbral fisiológico normal, no existe un riesgo como tal para la salud de los terneros (Jacometo et al., 2015). Por otro lado, Bartelsen & Jensen (2015) describieron que el Mn genera tasas gluconogénicas en el hígado, lo que facilita el ahorro de glucosa de las funciones de mantenimiento en el crecimiento de tejidos, generando un efecto directo de los minerales traza inyectables que contienen Mn en una reducción de la temperatura rectal (Bartelsen & Jensen, 2023; Jacometo et al., 2015). Finalmente, los datos disponibles sugieren que la suplementación con minerales traza puede mejorar la respuesta inmune e influir en los procesos metabólicos, pero el mecanismo específico o el efecto consistente sobre la reducción de la temperatura rectal no se ha establecido en los estudios previamente descritos.

### **5.3. Efecto de la suplementación mineral en perfiles químicos en sangre**

En el presente estudio se observó una tendencia a incrementar la cuantificación de glóbulos blancos y rojos en terneros suplementados con minerales traza inyectables como fuente de Zn, Se, Mn y Cu (Nennich et al., 2010). El efecto principal de la interacción de estos minerales sobre los glóbulos blancos es una mejora en la función y, en algunos casos, un aumento del recuento general en sangre, particularmente en periodos de desafío inmunológico, como el periodo de lactación (Hoyos-Jaramillo et al., 2025). El Zn y Cu se han reportado como coadyuvantes en incrementar la capacidad para fagocitar y eliminar fagocitos en sangre, debido a que principalmente son componentes esenciales de las enzimas de antioxidantes como el glutatión peroxidasa y el superóxido dismutasa, las cuales han sido clasificadas en diversos estudios con el potencial para proteger a los leucocitos del daño causado por las especies reactivas de oxígeno producidas durante las demandas metabólicas en la lactación (Bordignon et al., 2019). De acuerdo con Glombowsky et al. (2018), un mineral inyectable que contenga Zn y Cu generará inmediatamente en terneros un

aumento del recuento de leucocitos y estimulará la eritropoyesis en los primeros 30 días de vida, cuando los animales reciban alguna fuente adicional, ya sea oral o inyectada. De acuerdo con nuestros resultados, esta observación puede compararse con los obtenidos por Teixeira et al. (2014), quienes observaron el mismo incremento en estas células sanguíneas en terneros Holstein suplementados en dos momentos específicos durante el período de lactancia. Además, Hoyos-Jaramillo et al. (2025) describieron que un aumento de los glóbulos blancos y rojos provoca una estimulación directa de la proliferación y la función de las células inmunes.

En el mismo sentido, desde nuestra perspectiva, teorizamos a partir de estudios en pequeños rumiantes, que nuestros resultados se deben a la reducción de la hemoglobina corpuscular media, en la que el aumento del suministro de Cu en sangre reduce la disponibilidad de Fe para la síntesis de hemoglobina (Palomares, 2022). Una manera de comprobarlo pudiera ser mediante la cuantificación de ceruloplasmina, debido a que en cabritos Bóer, se ha reportado que la adición de cobre en rumiantes recién nacidos y suplementados a los 30 días posnacimiento redujo los niveles de hemoglobina corpuscular media en sangre, generando que el hígado solicite en mayor cantidad un suministro de hierro al sistema, lo que esto puede ser deficiente dependiendo de la dieta sólida que los terneros estén consumiendo. No obstante, es importante señalar, que lo que proponemos es mayor investigación en terneros, para estudiar que suministros son necesarios a nivel de macrominerales para evitar un trabajo extra por parte del hígado, ya que si bien, en el presente estudio la suplementación con minerales traza demuestra ser una estrategia efectiva para mejorar los parámetros de salud, los terneros son susceptibles en ciertos estadios de lactancia a las reducciones de hierro.

En cuanto a las menores concentraciones de glucosa sérica en los primeros 30 días de vida de los terneros suplementados con minerales traza inyectados, y el posterior incremento de la concentración de glucosa sérica a partir de la segunda administración parenteral, nosotros teorizamos que este efecto pudiera estar relacionado a la modulación de la glucosa por influencia de la concentración de Mn en el animal, debido a que el Mn pudiera desplazar la utilización de glucosa hacia el

crecimiento y las funciones inmunitarias en lugar del mantenimiento. Estas observaciones son similares a las de Jacometo et al. (2015), en donde terneros que recibieron una sola aplicación de minerales inyectables redujeron sus niveles de glucosa y algunos metabolitos plasmáticos, no obstante, los autores concluyeron que la respuesta inmune fue el objetivo central de su investigación, y que aunque no se midió directamente los niveles de glucosa para el crecimiento, se plantea la hipótesis que existe un aumento de gluconeogénesis a través del metabolismo hepático del Mn (Jacometo et al., 2015). Desde esta perspectiva, nosotros hipotetizamos que los niveles de glucosa se ven afectados no solo por la concentración de Mn suministrado al animal, sino que además el consumo de dieta sólida aumento posterior al mes de vida en los terneros suplementados con MI, por lo que los minerales pudieran mejorar el estado de salud en general y posteriormente potencializar el estado de ánimo del ternero, generando mayores concentraciones de glucosa sérica. Los mecanismos propuestos por nosotros se basan en observaciones directas de la concentración de glucosa sérica; sin embargo, se requiere más investigación que incluya la medición directa de glucosa sérica posterior a la administración del mineral y la cuantificación de Mn en suero sanguíneo o en tejido hepático. Finalmente, un resultado prometedor, fue la concentración de triglicéridos en suero sanguíneo, ya que pudiera indicar que el aumento se debe a una actividad óptima de la hormona tiroidea y posibles cambios en el metabolismo lipídico asociados con un estado antioxidante mejorado (Bicalho et al., 2014; Teixeira et al., 2014). No obstante, se requiere información sobre estas variables para formular una conjetura más asertiva.

## VI. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirman la eficacia de la suplementación con MI que contienen Zn, Mn, Se y Cu en dos aplicaciones en terneros Holstein lactantes. Específicamente, el uso parenteral de estos MI como estrategia nutrimental fue determinante en la optimización del crecimiento, el metabolismo y la salud de los terneros Holstein durante su lactación. Se determinó que la administración con MI no solo generó un incremento estadísticamente significativo en la ganancia de peso, sino que también modificó favorablemente diversos parámetros bioquímicos. Particularmente, las concentraciones elevadas de metabolitos sanguíneos, como la glucosa y los triglicéridos, sugieren una mejora en la eficiencia metabólica y una mayor capacidad de partición de nutrientes hacia los procesos metabólicos. En consecuencia, este trabajo de investigación establece que la suplementación con MI constituye una herramienta de manejo fundamental para mitigar las deficiencias del estatus mineral en terneros, independientemente del balance nutrimental que generó la madre durante la gestación. Por lo tanto, los MI potencian el desempeño durante la fase crítica de transición de terneros lactantes a destetados.

Finalmente, se requiere mayor investigación sobre la descripción de los terneros lactantes suplementados con MI en su vida posdestete, para dilucidar si la suplementación con MI es suficiente para mejorar la trayectoria de su vida productiva, al menos durante el primer año de vida.

## VII. LITERATURA CITADA

- Bach, A., Ahedo, J., & Ferrer, A. (2010). Optimizing weaning strategies of dairy replacement calves. *Journal of Dairy Science*, 93(1), 413–419. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2682>
- Bartens, M.-C., Drillich, M., Rychli, K., Iwersen, M., Arnholdt, T., Meyer, L., & Klein-Jöbstl, D. (2016). Assessment of different methods to estimate bovine colostrum quality on farm. *New Zealand Veterinary Journal*, 64(5), 263–267. <https://doi.org/10.1080/00480169.2016.1184109>
- Batistel, F., Osorio, J. S., Ferrari, A., Trevisi, E., Socha, M. T., & Loor, J. J. (2016a). Immunometabolic Status during the Peripartum Period Is Enhanced with Supplemental Zn, Mn, and Cu from Amino Acid Complexes and Co from Co Glucoheptonate. *PLoS ONE*, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155804>
- Batistel, F., Osorio, J. S., Ferrari, A., Trevisi, E., Socha, M. T., & Loor, J. J. (2016b). Immunometabolic Status during the Peripartum Period Is Enhanced with Supplemental Zn, Mn, and Cu from Amino Acid Complexes and Co from Co Glucoheptonate. *PLoS ONE*, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155804>
- Bertelsen, M., & Jensen, M. B. (2023). Comparing weaning methods in dairy calves with different dam contact levels. *Journal of Dairy Science*, 106. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23393>
- Bicalho, M. L. S., Lima, F. S., Ganda, E. K., Foditsch, C., Meira, E. B. S., Machado, V. S., Teixeira, A. G. V., Oikonomou, G., Gilbert, R. O., & Bicalho, R. C. (2014). Effect of trace mineral supplementation on selected minerals, energy metabolites, oxidative stress, and immune parameters and its association with uterine diseases in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 97(7), 4281–4295. <https://doi.org/10.3168/JDS.2013-7832>
- Bittar, J. H. J., Hurley, D. J., Woolums, A. R., Norton, N. A., Barber, C. E., Moliere, F., Havenga, L. J., & Palomares, R. A. (2018). Effects of injectable trace minerals on the immune response to *Mannheimia haemolytica* and *Pasteurella multocida* following vaccination of dairy calves with a commercial attenuated-live bacterin

vaccine. *The Professional Animal Scientist*, 34. <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01695>

Black, R. A., Whitlock, B. K., & Krawczel, P. D. (2017). Effect of maternal exercise on calf dry matter intake, weight gain, behavior, and cortisol concentrations at disbudding and weaning. *Journal of Dairy Science*, 100(9), 7390–7400. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12191>

Blum, J. W., Zbinden, Y., Hammon, H. M., & Chilliard, Y. (2005). Plasma leptin status in young calves: effects of pre-term birth, age, glucocorticoid status, suckling, and feeding with an automatic feeder or by bucket. *Domestic Animal Endocrinology*, 28(2), 119–133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2004.06.011>

Bolt, S. L., Boyland, N. K., Mlynski, D. T., James, R., & Croft, D. P. (2017). Pair Housing of Dairy Calves and Age at Pairing: Effects on Weaning Stress, Health, Production and Social Networks. *PLOS ONE*, 12(1), e0166926. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166926>

Bordignon, R., Volpato, A., Glombowsky, P., Souza, C. F., Baldissera, M. D., Secco, R., Pereira, W. A. B., Leal, M. L. R., Vedovatto, M., & Da Silva, A. S. (2019). Nutraceutical effect of vitamins and minerals on performance and immune and antioxidant systems in dairy calves during the nutritional transition period in summer. *Journal of Thermal Biology*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.07.034>

Carlson, H., Cullens-Nobis, F. M., Owczarzak, E. J., & Abuelo, A. (2024). Effect of parenteral micronutrient supplementation at birth on immunity, growth, and health in preweaning dairy heifers. *Journal of Dairy Science*, 107. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24292>

Cashman, K. D. (2002). MINERALS IN DAIRY PRODUCTS | Trace Elements, Nutritional Significance. In *Encyclopedia of Dairy Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227235-8/00732-X>

Castro, M. M. D., Silva, A. L., Costa e Silva, L. F., Rotta, P. P., Engle, T. E., & Marcondes, M. I. (2019). Determination of macromineral requirements for

- preweaned dairy calves in tropical conditions. *Journal of Dairy Science*, 102. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15166>
- Chigerwe, M., & Hagey, J. V. (2014). Refractometer assessment of colostral and serum IgG and milk total solids concentrations in dairy cattle. *BMC Veterinary Research*, 10(1), 178. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0178-7>
- Contreras, D. A., Lidfors, L., Galina, C. S., García, B., & Hernández, C. E. (2024). Evaluation of raising dairy calves by foster cows in Mexico. *Journal of Dairy Research*, 91(4), 397–402. <https://doi.org/10.1017/S0022029925000172>
- Eckert, E., Brown, H. E., Leslie, K. E., DeVries, T. J., & Steele, M. A. (2015). Weaning age affects growth, feed intake, gastrointestinal development, and behavior in Holstein calves fed an elevated plane of nutrition during the preweaning stage. *Journal of Dairy Science*, 98. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9062>
- Engelking, L. E., Matsuba, T., Inouchi, K., Sugino, T., & Oba, M. (2020). Effects of feeding hay and calf starter as a mixture or as separate components to Holstein calves on intake, growth, and blood metabolite and hormone concentrations. *Journal of Dairy Science*, 103(5), 4423–4434. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17676>
- Gallegos-Daniel, C., Taddei-Bringas, C., & González-Córdova, A. F. (2023). Panorama de la industria láctea en México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v33i61.1251>
- Galyean, M. L., Duff, G. C., & Rivera, J. D. (2022). Galyean Appreciation Club Review: revisiting nutrition and health of newly received cattle—what have we learned in the last 15 years? *Journal of Animal Science*, 100. <https://doi.org/10.1093/jas/skac067>
- Glombowsky, P., da Silva, A. S., Soldá, N. M., Galli, G. M., Biazus, A. H., Campigotto, G., Bottari, N. B., Sousa, R. S., Brisola, M. C., Stefani, L. M., Baldissera, M. D., Leal, M. L. R., Morsch, V. M., Schetinger, M. R. C., & Machado, G. (2018a). Mineralization in newborn calves contributes to health, improve the antioxidant

system and reduces bacterial infections. *Microbial Pathogenesis*, 114, 344–349.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.12.012>

Glombowsky, P., da Silva, A. S., Soldá, N. M., Galli, G. M., Biazus, A. H., Campigotto, G., Bottari, N. B., Sousa, R. S., Brisola, M. C., Stefani, L. M., Baldissera, M. D., Leal, M. L. R., Morsch, V. M., Schetinger, M. R. C., & Machado, G. (2018b). Mineralization in newborn calves contributes to health, improve the antioxidant system and reduces bacterial infections. *Microbial Pathogenesis*, 114.  
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.12.012>

Godden, S. (2008). Colostrum Management for Dairy Calves. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 24(1), 19–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2007.10.005>

Guo, C., Wang, X., Dai, D., Kong, F., Wang, S., Sun, X., Li, S., Xu, X., & Zhang, L. (2023). Effects of alkaline mineral complex supplementation on production performance, serum variables, and liver transcriptome in calves. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1282055>

Hammon, H. M., Liermann, W., Frieten, D., & Koch, C. (2020). Review: Importance of colostrum supply and milk feeding intensity on gastrointestinal and systemic development in calves. *Animal*, 14, s133–s143.  
<https://doi.org/10.1017/S1751731119003148>

Hernandez, G. P., Ferreira, M. F. L., Santos, A. C. R., Bohnert, D., & Ranches, J. (2023). Effects of Trace Mineral Injections on Measures of Growth and Trace Mineral Status of Primiparous Cows and their Calves. *Translational Animal Science*, 8. <https://doi.org/10.1093/tas/txae068>

Hoyos-Jaramillo, A., Palomares, R. A., Bittar, J. H. J., Hurley, D. J., Rodríguez, A., González-Altamiranda, E. A., Kirks, S., Gutierrez, A., Wall, S., Miller, K., Urdaneta, J., Skrada, K., Lopez, D., & Fenley, M. (2025). Circulating T cell subpopulations in dairy calves infected with Bovine viral diarrhoea virus 2 and Bovine herpes virus 1 following modified-live virus booster vaccination: Effects of the administration route

and trace mineral supplementation. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2024.110871>

Jacometo, C. B., Osorio, J. S., Socha, M., Corrêa, M. N., Piccioli-Cappelli, F., Trevisi, E., & Loor, J. J. (2015). Maternal consumption of organic trace minerals alters calf systemic and neutrophil mRNA and microRNA indicators of inflammation and oxidative stress. *Journal of Dairy Science*, 98. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9359>

Jafri, S. H., Adnan, K. M. M., Baimbill Johnson, S., Talukder, A. A., Yu, M., & Osei, E. (2024). Challenges and Solutions for Small Dairy Farms in the U.S.: A Review. *Agriculture*, 14(12), 2369. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122369>

Jorgensen, M. W., Janni, K., Adams-Progar, A., Chester-Jones, H., Salfer, J. A., & Endres, M. I. (2017). Housing and management characteristics of calf automated feeding systems in the Upper Midwest of the United States. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9881–9891. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12792>

Jung, J., & Lidfors, L. (2001). Effects of amount of milk, milk flow and access to a rubber teat on cross-sucking and non-nutritive sucking in dairy calves. *Applied Animal Behaviour Science*, 72(3), 201–213. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(01\)00110-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(01)00110-1)

Kim, Y.-H., Nagata, R., Ohtani, N., Ichijo, T., Ikuta, K., & Sato, S. (2016). Effects of Dietary Forage and Calf Starter Diet on Ruminal pH and Bacteria in Holstein Calves during Weaning Transition. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01575>

Kotsampasi, B., Karatzia, M. A., Tsiokos, D., & Chadio, S. (2024). Nutritional Strategies to Alleviate Stress and Improve Welfare in Dairy Ruminants. *Animals*, 14(17), 2573. <https://doi.org/10.3390/ani14172573>

Lago, A., Socha, M., Geiger, A., Cook, D., Silva-del-Río, N., Blanc, C., Quesnell, R., & Leonardi, C. (2018). Efficacy of colostrum replacer versus maternal colostrum on immunological status, health, and growth of preweaned dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 101(2), 1344–1354. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13032>

- Lassala, A., Hernández-Cerón, J., Pedernera, M., González-Padilla, E., & Gutierrez, C. G. (2020). Cow-calf management practices in Mexico: Reproduction and breeding. *Veterinaria México* OA, 7(1). <https://doi.org/10.22201/fmvz.24486760e.2020.1.839>
- Lee-Rangel, H. A., Mendoza-Martinez, G. D., Diaz de León-Martínez, L., Relling, A. E., Vazquez-Valladolid, A., Palacios-Martínez, M., Hernández-García, P. A., Chay-Canul, A. J., Flores-Ramirez, R., & Roque-Jiménez, J. A. (2022). Application of an Electronic Nose and HS-SPME/GC-MS to Determine Volatile Organic Compounds in Fresh Mexican Cheese. *Foods*, 11(13), 1887. <https://doi.org/10.3390/foods11131887>
- Lim, H.-J., Lee, S., Park, W., Park, E., & Yoo, J. G. (2024). Mineral patterns in hair: A decisive factor between reproducible and repeat breeder dairy cows. *PLoS ONE*, 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301362>
- Lora, I., Gottardo, F., Contiero, B., Dall'Ava, B., Bonfanti, L., Stefani, A., & Barberio, A. (2018). Association between passive immunity and health status of dairy calves under 30 days of age. *Preventive Veterinary Medicine*, 152, 12–15. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2018.01.009>
- Lusby, K. S. (2006). Nutrition Programs for Lightweight Calves. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 22(2), 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2006.03.001>
- Mandel, C., Adams-Progar, A., Sischo, W. M., & Moore, D. A. (2017). Short communication: Predictors of time to dairy calf bucket training. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9769–9774. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13208>
- Martínez-García, C. G., Dorward, P., & Rehman, T. (2013). Factors influencing adoption of improved grassland management by small-scale dairy farmers in central Mexico and the implications for future research on smallholder adoption in developing countries. *Livestock Science*, 152(2), 228–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.10.007>

- Medrano-Galarza, C., LeBlanc, S. J., DeVries, T. J., Jones-Bitton, A., Rushen, J., Marie de Passillé, A., Endres, M. I., & Haley, D. B. (2018). Effect of age of introduction to an automated milk feeder on calf learning and performance and labor requirements. *Journal of Dairy Science*, *101*(10), 9371–9384. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14390>
- Medrano-Galarza, C., LeBlanc, S. J., DeVries, T. J., Jones-Bitton, A., Rushen, J., Marie de Passillé, A., & Haley, D. B. (2017). A survey of dairy calf management practices among farms using manual and automated milk feeding systems in Canada. *Journal of Dairy Science*, *100*(8), 6872–6884. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12273>
- Mee, J. F. (2023). Invited review: Bovine neonatal morbidity and mortality—Causes, risk factors, incidences, sequelae and prevention. *Reproduction in Domestic Animals*, *58*(S2), 15–22. <https://doi.org/10.1111/rda.14369>
- Moran, J. (2005). *Tropical Dairy Farming*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/9780643093133>
- Moreno Ramos, R. N. (2021). Family labour organization for dairy farming in western Mexico. Between the search for productivity and wellbeing. *Journal of Rural Studies*, *88*, 354–367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.08.005>
- Mousavi-Haghshenas, M. A., Hashemzadeh, F., Ghorbani, G. R., Ghasemi, E., Rafiee, H., & Ghaffari, M. H. (2022). Trace minerals source in calf starters interacts with birth weights to affect growth performance. *Scientific Reports*, *12*(1), 18763. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23459-4>
- Neethirajan, S. R. (2023). *AI-Driven Climate Neutrality in Dairy Farming: Benchmarking Emissions for Sustainable Transformation*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/4znq5>
- Nennich, T. D., Crenwelge, J. R., Lambert, B. D., Cherry, N. M., & Jordan, E. R. (2010). CASE STUDY: Effects of Supplementing Injectable Trace Minerals on Dairy Calf Performance. *The Professional Animal Scientist*, *26*. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30665-3](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30665-3)

- Ngeno, V. (2024). Adoption of dairy feed technology and its impact on smallholder farmers' income and poverty in Kenya's south-western region. *Scientific African*, 23, e02123. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02123>
- Palczynski, L. J., Bleach, E. C. L., Brennan, M. L., & Robinson, P. A. (2020). Appropriate Dairy Calf Feeding from Birth to Weaning: "It's an Investment for the Future." *Animals*, 10(1), 116. <https://doi.org/10.3390/ani10010116>
- Palomares, R. A. (2022). Trace Minerals Supplementation with Great Impact on Beef Cattle Immunity and Health. *Animals*, 12(20), 2839. <https://doi.org/10.3390/ani12202839>
- Pempek, J. A., Eastridge, M. L., Swartzwelder, S. S., Daniels, K. M., & Yohe, T. T. (2016). Housing system may affect behavior and growth performance of Jersey heifer calves. *Journal of Dairy Science*, 99(1), 569–578. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10088>
- Phipps, A. J., Beggs, D. S., Murray, A. J., Mansell, P. D., Stevenson, M. A., & Pyman, M. F. (2016). Survey of bovine colostrum quality and hygiene on northern Victorian dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 99(11), 8981–8990. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11200>
- Pogge, D. J., Richter, E. L., Drewnoski, M. E., & Hansen, S. L. (2012). Mineral concentrations of plasma and liver after injection with a trace mineral complex differ among Angus and Simmental cattle. *Journal of Animal Science*, 90(8), 2692–2698. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4482>
- Quigley, J. D., Deikun, L., Hill, T. M., Suarez-Mena, F. X., Dennis, T. S., & Hu, W. (2019). Effects of colostrum and milk replacer feeding rates on intake, growth, and digestibility in calves. *Journal of Dairy Science*, 102(12), 11016–11025. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16682>
- Rogers-Montoya, N. A., Herrera-Haro, J. G., Callejas-Juárez, N., Villavicencio-Gutiérrez, M. del R., Vilchis-Granados, G. B., González-Hernández, V., González-López, R., Ruiz-Torres, M. E., & Martínez-Castañeda, F. E. (2024). Milking to

- 2030: Economic and sustainability prospective of the Mexican dairy sector. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i5.2841>
- Rosenberger, K., Costa, J. H. C., Neave, H. W., von Keyserlingk, M. A. G., & Weary, D. M. (2017). The effect of milk allowance on behavior and weight gains in dairy calves. *Journal of Dairy Science*, *100*. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11195>
- Roshanzamir, H., Rezaei, J., & 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*. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.08.003>
- Seppä-Lassila, L., Sarjokari, K., Hovinen, M., Soveri, T., & Norring, M. (2016). Management factors associated with mortality of dairy calves in Finland: A cross sectional study. *The Veterinary Journal*, *216*, 164–167. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2016.07.008>
- Shamsuddoha, M., Nasir, T., & Hossain, N. U. I. (2023). A Sustainable Supply Chain Framework for Dairy Farming Operations: A System Dynamics Approach. *Sustainability*, *15*(10), 8417. <https://doi.org/10.3390/su15108417>
- Silva, T. H., Guimaraes, I., Menta, P. R., Fernandes, L., Paiva, D., Ribeiro, T. L., Celestino, M. L., Netto, A. S., Ballou, M. A., & Machado, V. S. (2022). Effect of injectable trace mineral supplementation on peripheral polymorphonuclear leukocyte function, antioxidant enzymes, health, and performance in dairy cows in semi-arid conditions. *Journal of Dairy Science*, *105*(2), 1649–1660. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20624>
- Soberon, F., Raffrenato, E., Everett, R. W., & Van Amburgh, M. E. (2012a). Preweaning milk replacer intake and effects on long-term productivity of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, *95*(2), 783–793. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4391>
- Soberon, F., Raffrenato, E., Everett, R. W., & Van Amburgh, M. E. (2012b). Preweaning milk replacer intake and effects on long-term productivity of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, *95*(2), 783–793. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4391>

- Soumati, B., Atmani, M., Benabderrahmane, A., & Benjelloun, M. (2023). Whey Valorization – Innovative Strategies for Sustainable Development and Value-Added Product Creation. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 86–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
- Springman, S. A., Maddux, J. G., Drewnoski, M. E., & Funston, R. N. (2018). Effects of injectable trace minerals on reproductive performance of beef heifers in adequate trace mineral status. *The Professional Animal Scientist*, 34. <https://doi.org/10.15232/pas.2018-01752>
- Teixeira, A. G. V, Lima, F. S., Bicalho, M. L. S., Kussler, A., Lima, S. F., Felipe, M. J., & Bicalho, R. C. (2014). Effect of an injectable trace mineral supplement containing selenium, copper, zinc, and manganese on immunity, health, and growth of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 97(7), 4216–4226. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7625>
- Van Emon, M., Sanford, C., & McCoski, S. (2020). Impacts of Bovine Trace Mineral Supplementation on Maternal and Offspring Production and Health. *Animals*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/ani10122404>
- van Niekerk, J. K., Fischer-Tlustos, A. J., Wilms, J. N., Hare, K. S., Welboren, A. C., Lopez, A. J., Yohe, T. T., Cangiano, L. R., Leal, L. N., & Steele, M. A. (2021). ADSA Foundation Scholar Award: New frontiers in calf and heifer nutrition—From conception to puberty. *Journal of Dairy Science*, 104(8), 8341–8362. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20004>
- Vargas-Canales, J. M. (2023). Technological Capabilities for the Adoption of New Technologies in the Agri-Food Sector of Mexico. *Agriculture*, 13(6), 1177. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061177>
- Vasseur, E., Borderas, F., Cue, R. I., Lefebvre, D., Pellerin, D., Rushen, J., Wade, K. M., & de Passillé, A. M. (2010). A survey of dairy calf management practices in Canada that affect animal welfare. *Journal of Dairy Science*, 93(3), 1307–1316. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2429>

- Vedovatto, M., da Silva Pereira, C., Cortada Neto, I. M., Moriel, P., Morais, M. da G., & Franco, G. L. (2020). Effect of a trace mineral injection at weaning on growth, antioxidant enzymes activity, and immune system in Nellore calves. *Tropical Animal Health and Production*, 52(2), 881–886. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02056-0>
- Ventura, B. A., von Keyserlingk, M. A. G., Schuppli, C. A., & Weary, D. M. (2013). Views on contentious practices in dairy farming: The case of early cow-calf separation. *Journal of Dairy Science*, 96(9), 6105–6116. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6040>