



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
MAESTRÍA EN SALUD Y PRODUCCIÓN ANIMAL SUSTENTABLE**

**“Efecto de la inclusión de diferentes niveles de un Complejo Metionina-Cromo-Zinc en la dieta de finalización sobre el comportamiento productivo y rendimiento de la canal en bovinos de carne”.**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de**

**Maestro en Salud y Producción Animal Sustentable.**

**Presenta:**

**M.V.Z. Rodrigo Núñez Piña.**

**Dirigido por:**

**Dra. Tércia Cesária Reis de Souza.**

**Co-Dirigido por:**

**Dr. Ramsés Carrasco Jiménez.**

**C.U. QUERÉTARO, QRO.**

**Febrero 2026.**

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
MAESTRÍA EN SALUD Y PRODUCCIÓN ANIMAL SUSTENTABLE**

**“Efecto de la inclusión de diferentes niveles de un Complejo Metionina-Cromo-Zinc en la dieta de finalización sobre el comportamiento productivo y rendimiento de la canal en bovinos de carne”.**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Salud y Producción Animal Sustentable.**

**Presenta:**

**M.V.Z. Rodrigo Núñez Piña.**

**Dirigido por:**

**Dra. Tércia Cesária Reis de Souza.**

**Co-Dirigido por:**

**Dr. Ramsés Carrasco Jiménez.**

**Sinodales:**

**Dra. Tércia Cesária Reis de Souza  
Presidente**

**Dr. Ramsés Carrasco Jiménez  
Secretario**

**Dr. Juan de Dios Garza Flores  
Vocal**

**Dra. Andrea Margarita Olvera Ramírez  
Vocal**

**Dr. Juan Carlos Silva Jarquín  
Vocal**

**Centro Universitario.  
Querétaro, Qro.  
Febrero 2026.  
México.**

## Resumen.

El 80% de los costos operativos en las unidades de producción pecuaria (UPP) son relacionados con la alimentación, para disminuir estos costos y mejorar la rentabilidad se han desarrollado diferentes estrategias, por ejemplo: mejorar la absorción y biodisponibilidad de los minerales al conjugarlos con compuestos orgánicos como la metionina. El objetivo del presente estudio fue comparar el efecto de la adición de diferentes dosis de un complejo de Metionina-Cromo-Zinc (CMCZ) en la dieta sobre el comportamiento productivo, y rendimiento de la canal, además de la relación costo-beneficio en bovinos de raza cárnica durante el periodo de finalización. Se utilizaron 1500 bovinos cruzados con  $473.83 \text{ kg} \pm 48.31$  de peso al inicio de la prueba, utilizando un modelo de bloques incompletos al azar. Los animales se alojaron aleatoriamente en 15 corrales con capacidad de 100 animales a los cuales se asignaron aleatoriamente a una dieta basal de la UPP a la cual se adicionaron tres dosis de un CMCZ constituyendo los tres tratamientos experimentales: Control) Dieta basal más 3.6 g de CMCZ, Media) Dieta basal más 7.2g CMCZ, Alta) Dieta basal más 10.8 g de CMCZ. Los animales se alimentaron diariamente *ad libitum* y el tratamiento se ofreció “top-dressed”. Los datos se analizaron estadísticamente utilizando el procedimiento GLM del programa SAS. La diferencia entre medias se analizó con una prueba de LSMEANS utilizando el peso inicial como covariable para el consumo de materia seca. El peso final, ganancia de peso total, ganancia diaria de peso, peso canal caliente y grado de rendimiento en canal no fue afectado por los tratamientos. El grupo de la dosis alta presentó un menor consumo, seguido del control. El grupo de la dosis media presentó el mayor consumo de materia seca. Se observó una tendencia a mejorar la conversión alimenticia por parte de los grupos de dosis alta y control respecto a la dosis intermedia. El costo de suplementar la dosis alta del complejo respecto al grupo control durante los 35 días de finalización presenta una tasa de retorno de la inversión de 62.5%. Con los resultados obtenidos, se recomienda seguir evaluando la dosis alta.

**Palabras clave:** Minerales orgánicos, Aditivos, Bovino de engorda, Rendimiento canal.

### **Summary.**

80% of the operating costs in livestock production units (PPUs) are related to feed, to reduce these costs and improve profitability, different strategies have been developed, for example: improving the absorption and bioavailability of minerals by combining them with organic compounds such as methionine. The objective of the present study was to compare the effect of the addition of different doses of a Methionine-Chromium-Zinc complex (CMCZ) in the diet on productive behavior and carcass performance, as well as the cost-benefit ratio in beef cattle during the finishing period. 1500 crossbred cattle with  $473.83 \text{ kg} \pm 48.31 \text{ kg}$  weight were used at the start of the test, using a randomized incomplete block model. The animals were randomly housed in 15 pens with a capacity of 100 animals and randomly assigned to a basal diet of the UPP to which three doses of a CMCZ were added, constituting the three experimental treatments: Control) Basal diet + 3.6 g of CMCZ, Medium) Basal diet + 7.2 g of CMCZ, High) Basal diet + 10.8 g of CMCZ. The animals were fed daily *ad libitum* and the treatment was offered "top-dressed". The data were statistically analyzed using the GLM procedure of the SAS program. The difference between means was analyzed with an LSMEANS test using the initial weight as a covariate for dry matter intake. Final weight, total weight gain, daily weight gain, hot carcass weight and degree of carcass performance were not affected by the treatments. The high-dose group had the lowest consumption, followed by control. The medium-dose group had the highest dry matter intake. A trend towards improved feed conversion was observed in the high-dose and control groups compared to the intermediate dose. The cost of supplementing the high dose of the complex compared to the control group during the 35 days of completion has a return on investment rate of 62.5%. With the results obtained, it is recommended to continue evaluating the high dose.

**Key words:** Organic minerals, additives, beef cattle, carcass processing.

**Dedicatoria.**

A mi prometida Citlaty Ma. De los Ángeles Balderas Moreno por todo su apoyo, cariño, amor, por estar a mi lado durante todo el periodo, por compartir nuestras alegrías, éxitos y por estar conmigo en los momentos más difíciles.

A mi familia quien me ha apoyado a pesar de todo y por la unión que siempre hemos tenido:

- Ma. Guadalupe Núñez Piña.
- Ma. Del Carmen Núñez Piña.
- Rosa Ma. Núñez Piña.
- David Joshua Loarca Calderón y Claudia Yvonne Hernández Franco.
- Guadalupe Jimena Loarca Calderón.
- Familia Núñez Perusquía.
- Lamberto y Tere Piña Rico.
- Mi fiel compañero Han Solo.
- Clementina, Robin.

A todos los que han sido fundamentales en mi vida, pero que lamentablemente se nos adelantaron en el camino:

- Susana Piña Rico.
- Teresa Piña Rico.
- Ramón Núñez Piña.
- Sergio Núñez Olguín.
- David Loarca Piña.
- Salvador Zamorano Acosta.
- Talismán, Leia, Bartola, Robin, Tomasa, Tobías.
- Dr. Roberto Zambrano Gaytán.

## **Agradecimientos.**

- A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser una parte importante en mi desarrollo académico.
- A la Maestría en Salud y Producción Animal Sustentable y al cuerpo académico que durante estos años nos compartieron sus conocimientos y enseñanzas.
- Al SECIHTI (CONAHCyT) por el apoyo brindado durante todo este periodo.
- A la Empresa Global Animal Products, al Sr. T. J. Biggs y a los M.V.Z. Ismael Jiménez, César Baidón e Iván Huesca Soto por su invaluable apoyo para la realización de este proyecto.
- A la empresa Dos Matas S.P.R. de R. L., al Lic. Yamil García Casado, al M.V.Z. Francisco Sebastián Animas Adame, a la Contadora María Esther Molina por abrirme las puertas para poder realizar este trabajo, además a los supervisores y colaboradores de cada área por su apoyo.
- A la Dra. Tércia Cesária Reis de Souza por hacer este proyecto posible, por día a día brindarme todo su apoyo incondicional, sus enseñanzas y consejos.
- Al Dr. Juan De Dios Garza Flores por ser mi mentor en el apasionante mundo del corral de engorda y de la nutrición, por aconsejarme y brindarme invaluable enseñanzas, conocimientos y habilidades tanto teóricas como prácticas.
- Al Dr. Ramsés Carrasco Jiménez por darme la oportunidad de aprender de su amplia experiencia, conocimientos y además poder contar con su invaluable amistad.
- Al Dr. Juan Carlos Silva Jarquín por su apoyo, enseñanzas, conocimientos y consejos brindados.
- A la Dra. Andrea Margarita Olvera Ramírez por ser parte importante y fundamental en mi desarrollo académico, formando parte de mis comités de tesis desde la licenciatura.
- A la Dra. Ma. Guadalupe Bernal Santos por haberme impulsado y apoyado desde la licenciatura, muchas gracias por todo.

- Al Dr. José Guadalupe Gómez Soto, por ser un excelente profesionalista y ser humano, por siempre estar presente en mi desempeño profesional y académico.
- Al Dr. Rogelio Gómez Alarcón por los invaluable consejos y enseñanzas que me ha compartido.
- Al M. en C. Luis Daniel Juárez Cervantes, por siempre apoyarme y siempre brindarme conocimientos y habilidades.
- Al MVZ Benjamín Solorio Perrusquía por todas sus enseñanzas, apoyo y amistad.
- Al Dr. Urso Dávila Montero, al Dr. Benjamín Calva y a todos los compañeros de la Asociación Nacional de Veterinarios Taurinos A. C. por su amistad y por darme la oportunidad de pertenecer a esta gran familia.
- A la Sra. Patricia Pérez, por tantos años de amistad que nos ha brindado.
- A mis amigos Alejandro Henao Villegas, Stepha Isabelle Smith, Hermenegildo Olivas B., Steven Jácamo, Nelson Núñez, Leidis Ballesteros, César O. Ureña, José Wilberth Calvo, Humberto Hernández, José Ignacio Alzaga Epardo, Carlos Salazar, Sayra García T. Muchas gracias por su amistad, su apoyo y su cariño a lo largo de todos estos años.

Índice.	
Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice.....	vii
Índice de Cuadros.....	ix
Índice de Figuras.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
2.1. Minerales.....	3
2.1.1. <i>Minerales y su conjugación con compuestos orgánicos.</i> .....	5
2.1.2. <i>Cromo.</i> .....	7
2.1.2.1. <i>Cromo orgánico.</i> .....	13
2.1.2.1.1. <i>Metionina de cromo.</i> .....	14
2.1.2.2. <i>Cromo en bovinos.</i> .....	15
2.1.3. <i>Zinc.</i> .....	20
2.1.3.1. <i>Zinc orgánico.</i> .....	24
2.1.3.1.1. <i>Metionina de zinc.</i> .....	26
2.1.3.2. <i>Zinc en bovinos.</i> .....	28
2.2. Aminoácidos.....	29
2.2.1. <i>Metionina.</i> .....	31
2.2.1.1. <i>Metionina en bovinos.</i> .....	31
2.2.1.2. <i>Interacción metionina-cromo y zinc.</i> .....	33
III. HIPÓTESIS.....	35
IV. OBJETIVOS.....	36
4.1. <i>Objetivo general.</i> .....	36
4.2. <i>Objetivos específicos.</i> .....	36
V. MATERIAL Y MÉTODOS.....	37
5.1. <i>Bioética.</i> .....	37
5.2. <i>Lugar de estudio.</i> .....	37
5.3. <i>Manejo de los animales.</i> .....	37
5.4. <i>Diseño experimental.</i> .....	38

5.5. Manejo de los animales y aplicación del tratamiento. ....	38
5.6. Matanza y evaluación de Canales.....	39
5.7. Tasa de retorno de la inversión.....	40
5.8. Manejo de datos y análisis estadístico. ....	40
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
Impacto económico:.....	54
VII. CONCLUSIONES. ....	54
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	56

## Índice de Cuadros.

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1	Concentración de cromo en principales materias primas.....	13
2	Tratamientos experimentales.....	37
3	Calendario de actividades en el estudio.....	38
4	Comportamiento productivo de ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un Complejo Metionina-Cromo-Zinc.....	41
5	Peso y rendimiento de canal caliente en ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un Complejo Metionina-Cromo-Zinc.....	42

## Índice de Figuras.

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Efecto de la suplementación de propionato de cromo en la dieta sobre la concentración sérica de insulina en vaquillas posterior a una prueba de tolerancia a la glucosa.....	17
2	Efecto de la suplementación de propionato de cromo en la dieta sobre la concentración sérica de glucosa en vaquillas posterior a una prueba de tolerancia a la glucosa.....	18
3	Estructura general de los aminoácidos.....	30
4	Estructura de la metionina.....	31

## **I. INTRODUCCIÓN.**

Actualmente las Unidades de Producción Pecuaria (UPP) se enfrentan a diversos retos como lo son el cambio de uso de suelo, nuevas tendencias de consumo, volatilidad de precios de las materias primas y de los insumos, etc. Esto implica que cada vez existan menos áreas destinadas para la producción por parte del sector primario y que los costos de producción experimenten altibajos. Por su parte, el mercado está enfocándose en temas como calidad e inocuidad del producto final, bienestar animal, trato al personal, uso racional de antimicrobianos, uso eficiente de los recursos, como factores decisivos en la toma de decisiones de compra o elección de marcas.

Un reto continuo para las UPP es satisfacer las demandas de proteína de origen animal de una creciente población mundial pues para el año 2017, se estimaba una población mundial de 7.5 mil millones de seres humanos (Celis y Shimada 2018). El consumo de carne a nivel mundial superó las 268.5 millones de toneladas durante el 2022, de las cuales el 21% corresponde a carne de bovino, el 42% a la carne de cerdo, siendo Estados Unidos fue el país que produjo la mayor cantidad de carne de res con 12.9 millones de toneladas, seguido por Brasil y China con producciones de 10.4 y 7.1 millones de toneladas respectivamente, estos tres países produjeron la mitad del volumen mundial de carne de res. México por su parte presentó un consumo de 1.945 mil toneladas de carne de res, posicionándose en el 7ª lugar y el 6ª en consumo per cápita, siendo un país que presenta una autosuficiencia del 108% para dicha carne con una producción de 2.18 millones de toneladas de carne de res. De acuerdo con cifras oficiales (COMECARNE, 2023) Veracruz fue el estado que más carne produjo (281.13 miles de toneladas), seguido por Jalisco (256.817 miles de toneladas), en cambio Querétaro se encuentra en el lugar 22 con una producción de 36.39 miles de toneladas (COMECARNE, 2023).

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) reportó para el 2019 un inventario ganadero de 34,037,141 cabezas de ganado bovino, de los cuales 3,909,782 (11.49%) eran ganado en engorda, 8,936,399 (26.25%) eran ganado en desarrollo. El censo Agropecuario 2022 del INEGI, reportó un total de

24,553,565 cabezas de ganado bovino, de las cuales 2,981,964 (12.14%) fueron reses en engorda. En México, el INEGI (2022<sup>a</sup>) en el censo Agropecuario 2022, reportó que de los 24 millones de bovinos que había en el país, 14,577,729 se encontraban en libre pastoreo, 2,720,839 bajo un sistema de pastoreo controlado, 4,254,713 en sistemas estabulados, 1,088,811 bajo sistemas semi estabulados mientras que 1,911,473 no están especificados.

Dentro de las UPP, se plantean 4 pilares fundamentales para la producción, los cuales son: sanidad, manejo, genética y alimentación. Para las unidades de producción pecuaria, la alimentación representa entre el 60 y el 85% de los costos de producción, en el caso de ganado finalizado en corral de engorda, el costo de alimento representa alrededor del 70% del costo de producción (Shimada, 2018). El mejorar la eficiencia en la utilización de nutrientes es un aspecto importante para mejorar la sustentabilidad en la producción de carne de bovinos (Foote *et al.*, 2024). El ganado bovino, en comparación con otras especies productivas, presenta una baja eficiencia en la conversión de nutrientes a carne, sin embargo, los rumiantes en general tienen la capacidad de convertir forraje y fuentes de fibra indigestibles para humanos y algunas especies no rumiantes en fuentes de alimento (carne y leche).

En los últimos años se han desarrollado nuevas herramientas que mejoran la producción animal como el conjugar minerales (compuestos inorgánicos) con compuestos orgánicos (principalmente aminoácidos y proteínas), aumentando la absorción y aprovechamiento de los minerales. El cromo es considerado un mineral traza, que desempeña un papel fundamental para el metabolismo de lípidos, carbohidratos y proteínas en animales y humanos. El zinc es un mineral traza con funciones tan variadas como formar parte de más de 300 enzimas, es necesario para la replicación del ADN, tiene efecto antioxidante, actúa en el proceso de asimilación de las grasas, etc.

El presente estudio busca evaluar el efecto de la adición de diferentes dosis de un complejo de metionina-cromo-zinc (CMCZ) sobre el comportamiento productivo y rendimiento de la canal de bovinos finalizados en corral de engorda.

## **II. ANTECEDENTES.**

### **2.1. Minerales.**

Los minerales son elementos inorgánicos (Church *et al.*, 2002), los cuales son indispensables para diferentes funciones de los seres vivos (Castellanos y Shimada, 2018). Se han descrito 22 minerales que son requeridos por algunas especies animales para su desempeño y funcionamiento (Church *et al.*, 2002).

Una gran parte de los minerales se encuentran en los tejidos de los seres vivos, sin embargo; muchos de ellos se cree que están presentes en los organismos debido a que son ingeridos de la dieta (McDonald *et al.*, 2006).

Los minerales se pueden categorizar en esenciales y en no esenciales (Castellanos y Shimada, 2018; Jiménez *et al.*, 2014). Los “elementos minerales esenciales” son aquellos que han demostrado desempeñar funciones metabólicas en el organismo (McDonald *et al.*, 2006), además debe tener una función bioquímica. Los minerales esenciales se pueden clasificar dependiendo la función que desempeñan en el organismo, pudiendo ser estructurales, es decir que forman parte de la estructura de los tejidos del organismo (Ca, P, Mg, S, etc.), fisiológica o electrolitos que actúan en el mantenimiento de la presión osmótica, del equilibrio ácido-base, permeabilidad de membranas (Na, K, Cl, Ca, Mg), Catalizadores de enzimas y hormonas (Fe, Co, Zn, Mn, Mo, Se, etc.) y reguladores que actúan regulando la replicación celular, así como en la transcripción del ADN (Ca, I) (Underwood y Suttle, 2003).

Otra manera de clasificar los minerales es a través del grado de requerimiento en los animales, es decir macrominerales, los cuales son suministrados como gramos por día, pueden expresarse en porcentaje (%) de la materia seca de la ración (Church *et al.*, 2002), entre los macrominerales se encuentra el calcio, el fósforo, el sodio, el cloro, el potasio, el magnesio y el azufre (Church *et al.*, 2002; Tejada y Shimada, 2018). Los minerales traza, también llamados microminerales (Church *et al.*, 2002; Castellanos y Shimada, 2018), microelementos (Duffy *et al.*, 2023) u oligoelementos (Church *et al.*, 2002), se encuentran en bajas cantidades en el organismo (Castellanos y Shimada, 2018), los

cuales se agregan como miligramos por día (Hutjens, 2003) o miligramos por kg de alimento (Castellanos y Shimada, 2018) y se expresan cómo partes por millón en la materia seca de la dieta (Hutjens, 2003). Los minerales traza son vitales para el metabolismo y la productividad del ganado, pudiendo mejorar la calidad de la carne (Vellini *et al.*, 2020) ya que actúan principalmente como cofactores (Duffy *et al.*, 2023). Entre estos minerales se encuentra el hierro, el cobre, el cobalto, el manganeso, el zinc, el yodo, el molibdeno, el cromo y el selenio (Tejada y Shimada, 2018). Los oligoelementos activan los sistemas enzimáticos (Church *et al.*, 2002). Los minerales traza limitantes en bovinos en corral de engorda son el cobalto, el cobre, el yodo, el hierro, el manganeso, molibdeno, zinc y selenio (Mendoza *et al.*, 2018).

Los animales ingieren los minerales esenciales principalmente a través de los alimentos y del agua (Tejada y Shimada, 2018). La principal fuente mineral, proviene de las plantas y de productos vegetales (Monroy, 1986; McDonald *et al.*, 2006), la concentración de minerales presentes en las plantas puede variar dependiendo de las prácticas agroquímicas durante su cultivo, edad de la cosecha y las tecnologías de almacenamiento (Farionik *et al.*, 2023). Por otra parte, los alimentos utilizados en las raciones generalmente contienen bajas concentraciones de minerales, además pueden contener antagonistas de los minerales traza (Mo, Fe, S, etc.) (Ahola *et al.*, 2005), por ejemplo, el cromo se encuentra en bajas concentraciones en las plantas (Espino, 2011), con lo cual el aporte de minerales generalmente no llega a cubrir los requerimientos nutricionales de los animales. Los animales altamente productivos llegan a presentar mayores requerimientos de minerales, por lo cual es importante realizar la suplementación de minerales en las dietas con lo cual puede favorecerse la producción de carne, mejorar la salud y la calidad de la carne en bovinos de engorda (Farionik *et al.*, 2023).

La absorción de los minerales puede realizarse por difusión simple o por transportadores (McDonald *et al.*, 2006). La digestibilidad de los minerales está influenciada por la forma química del mineral, la edad y el sexo del animal, el porcentaje de inclusión de grasa en la dieta, el estado sanitario del animal, la

interacción entre minerales y la presencia de quelantes (Monroy, 1986), sin embargo, existe poca información sobre las diferencias raciales en la absorción y el metabolismo de los minerales traza (Duplessis *et al.*, 2025).

### **2.1.1. Minerales y su conjugación con compuestos orgánicos.**

Los minerales pueden encontrarse en forma inorgánica y orgánica, dependiendo de si la molécula a la que está unido el ion mineral contiene carbón. Los inorgánicos son sales con un anión unido a un catión y los minerales orgánicos están unidos a moléculas que contienen carbón (Baggerman, 2017) como aminoácidos, levaduras, etc. (McDonald *et al.*, 2006), también pueden estar unidos a proteínas o azúcares (Castellanos y Shimada, 2018). También se han utilizado ácidos orgánicos (ascórbico, cítrico, fumárico) como agentes quelantes, sin embargo, presentan una menor estabilidad que los aminoácidos como quelatos (Castellanos y Shimada, 2018). Los minerales orgánicos pueden venir en forma de complejo como en el caso de la metionina de zinc o quelados como el proteinato de cobre (Hutjens, 2003). De forma natural existen quelatos en los organismos, entre los cuales tenemos la hemoglobina con el hierro, la clorofila con el magnesio y la vitamina B<sub>12</sub> con el cobalto (Castellanos y Shimada, 2018).

Los minerales orgánicos se han desarrollado durante los últimos 30 años, teniendo un impacto importante en la industria (Castellanos y Shimada, 2018). Existen diferencias en el precio entre los minerales orgánicos e inorgánicos, siendo los orgánicos más caros (Hutjens, 2003; Castellanos y Shimada, 2018).

Fuentes inorgánicas presentan iones libres, los cuales pueden formar complejos con otros elementos afectando la absorción y utilización (McDonald *et al.*, 2006). Un aumento en la biodisponibilidad puede mejorar el aumento de peso, y los índices de conversión alimenticia en el ganado (Kessler *et al.*, 2003). El cromo en forma de óxido de cromo puede ser utilizado como marcador de digestibilidad debido a la falta de absorción del óxido de cromo en el tracto gastrointestinal (Baggerman, 2017).

El objetivo de esta tecnología es que los minerales orgánicos (también llamados quelatos), al encontrarse en solución, adquieran una fuerte carga negativa en el tracto gastrointestinal, esta carga busca igualarse con la de la membrana de la pared celular, lo que facilita su pasaje hacia el torrente sanguíneo (Castellanos y Shimada, 2018). Los minerales orgánicos se caracterizan por tener una mayor biodisponibilidad, especialmente cuando son conjugados con aminoácidos esenciales (Farionik *et al.*, 2023). Los minerales conjugados con péptidos y aminoácidos son llamados proteinatos (Castellanos y Shimada, 2018) y presentan mayor absorción, se cree que esto se debe a que son tomados por el mecanismo de absorción de los péptidos, en lugar de ser absorbidos por el mecanismo activo de los minerales (McDonald *et al.*, 2006, Zhang *et al.*, 2018). Estos compuestos son resistentes a los jugos gástricos (Castellanos y Shimada, 2018). En el caso de los quelatos con aminoácidos, la quelación se realiza a partir de iones metálicos y aminoácidos purificados de forma individual de los cuales se conoce el peso molecular (Ohh y Lee, 2005), la quelación se lleva a cabo entre el grupo amino y carboxilo de la metionina (que presenta cargas negativas), con el ion metálico (que presenta dos cargas positivas) (Castellanos y Shimada, 2018, Global Animal Products). Esta tecnología permite obtener un producto uniforme el cual se absorbe rápidamente ya que evita la digestión por el jugo gástrico y es metabolizado fácilmente a nivel de intestino delgado, debido a esto se menciona una mayor biodisponibilidad de los quelatos respecto a otros complejos metálicos orgánicos (Ohh y Lee, 2005).

Las ventajas de los minerales orgánicos son que presentan una disponibilidad cercana al 100%, no presentan interacciones con otros minerales, no son afectados por la solubilidad del medio, tienen mayor estabilidad al no ligarse con ninguna sustancia de la dieta (Castellanos y Shimada, 2018). Se ha reportado una biodisponibilidad entre el 1 y el 3%, mientras que el cromo orgánico tiene una biodisponibilidad entre el 15 y el 30%, es decir entre 10 y 30 veces mayor (Forbes y Erdman; 1983).

La suplementación con fuentes más biodisponibles de minerales aumenta los procesos metabólicos de otros nutrientes, mejorando la tasa de crecimiento y la calidad de la canal en bovinos (Farionik *et al.*, 2023). Algunos autores reportan un aumento en la inmunidad en ganado sometido a estrés. Durante la recepción del ganado se han reportado mejores respuestas inmunes cuando se utilizan fuentes orgánicas de minerales, lo que se traduce en mayores ganancias diarias de peso y mejores conversiones alimenticias, comparadas con las respuestas de animales que han sido alimentados con fuentes inorgánicas (George *et al.*, 1997).

Estudios han demostrado una disminución del 17.2% en la morbilidad de enfermedades respiratorias en novillas durante el periodo de recepción alimentadas con minerales orgánicos al triple de dosis respecto a vaquillas alimentadas con minerales inorgánicos o minerales orgánicos a dosis inferiores (George *et al.*, 1997). Por otro lado, ofrecer al ganado fuentes más biodisponibles de microelementos deficientes, puede incrementar el proceso metabólico de los principales nutrientes, lo cual podría mejorar la tasa de crecimiento y la calidad de la carne (Farionik *et al.*, 2023).

### **2.1.2. Cromo.**

El Cromo (Cr) es uno de los minerales más abundantes en la corteza terrestre, la asociación entre el cromo y el hierro forma una molécula llamada cromita, la cual representa 1/3000 partes de la corteza terrestre (Espino, 2011). El Cr es reconocido como un micronutriente para los mamíferos desde hace casi seis décadas (Vincent, 2000), existen dos formas del Cr, hexavalente y trivalente, por su parte el Cr hexavalente ha sido categorizado como tóxico (Ohh y Lee, 2005; Espino, 2011), además de ser carcinogénico (Baggerman, 2017), dicho Cr hexavalente es obtenido de actividades industriales y presenta una mayor digestibilidad (Castellanos y Shimada, 2018), mientras que el Cr en su forma trivalente es considerado un mineral traza con importante actividad para los seres vivos, incluido el ser humano, actuando en procesos metabólicos optimizando el efecto de la insulina sobre la acción de la glucosa a nivel celular (Mertz *et al.*, 1961; Castellanos

y Shimada, 2018), es un mineral traza esencial para el mantenimiento de la tolerancia a la glucosa normal, incluso se ha sugerido un efecto sobre la mejora de la utilización de glucosa en algunos pacientes con diabetes mellitus (Glinsmann y Mertz, 1966).

En 1954 se descubrió la importancia del Cr en la nutrición animal, dónde se reportó que la utilización de Cr incrementaba la síntesis de colesterol y ácidos grasos en el hígado de la rata (Church *et al.*, 2002). Los primeros estudios realizados en ratas demostraron que el Cr actúa en la utilización de glucosa (Vincent, 2000, McDonald *et al.*, 2006), estudios han demostrado que el Cr actúa en los tejidos sensibles a la insulina dónde potencializa la acción de la insulina (Spears *et al.*, 2012). Schwarz y Mertz (1959) observaron que ratas alimentadas con levadura de Torula (*Candida utilis*) como única fuente de proteína desarrollaban intolerancia a la glucosa, incapacidad que se revertía al incluir en la dieta alimentos ricos en cromo o complejos inorgánicos de cromo sintético. Estos hallazgos los llevaron a plantear la hipótesis de la existencia de un “factor de tolerancia”.

Ratas suplementadas durante 5 semanas con 1 mg de Cr en forma de hexaurea por cada 100 mg de alimento, presentaron mayores tasas de movilización de glucosa respecto a ratas que no habían sido suplementadas (Mertz *et al.*, 1960). Posteriormente, se observó que ratas y ratones alimentados con cereales y leche descremada, que contenían 100 µg de Cr/kg base húmeda suplementados con Cr presentaban una mayor tasa de crecimiento al ser suplementados con acetato de Cr (McDonald *et al.*, 2006). Estudios *in vitro*, demostraron que la suplementación de Cr trivalente presente en el factor de tolerancia a la glucosa mejoró la incorporación de glucosa en la grasa en tejido adiposo epididimario de ratas (Mertz *et al.*, 1960). Por sí solo, el Cr no ha demostrado tener un efecto sobre la absorción de la glucosa, pero con mayores niveles de insulina, el efecto del Cr sobre la absorción de glucosa aumenta, un estudio realizado *in vitro* utilizando grasa epididimal de ratas y una mili unidad de insulina, se observó una tasa de absorción de glucosa 67% mayor al suplementar Cr respecto al grupo no suplementado, por su parte al administrar 10 mili unidades de insulina, tejido sin cromo muestra tasas de absorción de glucosa

de 92  $\mu\text{g}$  de glucosa por hora, en estos niveles de insulina, no se observó efecto al suministrar 0.1  $\mu\text{g}$  de Cr (Mertz *et al.*, 1960). Los mecanismos por los cuales el Cr actúa sobre la concentración de glucosa e insulina en sangre no están completamente aclarados (Wang *et al.*, 2006; Malik *et al.*, 2024). Se cree que el Cr participa en el metabolismo de las proteínas y del ácido nucleico (McDonald *et al.*, 2006) principalmente porque forma un complejo llamado factor de tolerancia a la glucosa (McDonald *et al.*, 2006; Castellanos y Shimada, 2018) entre la insulina y sus receptores al interactuar con la niacina y la glutatona (McDonald *et al.*, 2006). En un estudio citado por Monterrosa (2008), además del ácido glutámico y ácido nicotínico, se menciona a la glicina y a la cisteína como parte del factor de tolerancia a la glucosa (FTG). La principal actividad del FTG es potencializar el metabolismo de la glucosa a través del organopéptido llamado cromodulina con lo cual aumenta la señalización de la insulina (Malik *et al.*, 2024). La cromodulina es una sustancia que se aisló y caracterizó en la década de 1980 por Wada y colaboradores, la cual también es llamada como Sustancia de Unión al Cromo de Bajo Peso Molecular, la cual está constituida por 4 aminoácidos como glicina, cisteína, glutamato y aspartato (Vincent, 2000; Castellanos y Shimada, 2018) que además une cuatro iones de Cr, dicha molécula ha sido aislada en diferentes especies de mamíferos, la cromodulina es almacenada en el citosol y en el núcleo de la células sensitivas a insulina en su forma “apo” (Vincent, 2000). Como respuesta a un aumento en los niveles de azúcar circulantes en sangre, el organismo libera insulina al torrente sanguíneo, la insulina se une a la subunidad  $\alpha$  externa de una proteína transmembranal receptora de insulina, lo cual provoca un cambio en la conformación del receptor, el receptor autofosforila los residuos de tirosina en la porción interna de la subunidad  $\beta$ , convirtiendo al receptor en una quinasa activa (Vincent, 2000). Estudios citados por Lashkari *et al.* (2018) mencionan que la acción de la insulina en los adipocitos es mediada por la activación de la fosfortirosina fosfatasa donde la desfosforilación de residuos de tirosina de proteínas específicas en membranas celulares puede estar involucrada en diversas acciones de cromo en el metabolismo animal, esta activación en la señalización intracelular, aumenta la captación de glucosa y regula

los niveles de ARNm del transportador de glucosa tipo 4 del receptor de insulina, la glucógeno sintasa y la proteína desacopladora-3 en células del músculo esquelético, con lo cual se da un aumento de la sensibilidad a la insulina aumentando la absorción de glucosa y aminoácidos. Cuando hay un aumento en los niveles de insulina, el Cr circulante se moviliza a los receptores  $\alpha$  de las células sensibles a insulina (Vincent, 2000; Castellanos y Shimada, 2018), esta transferencia es mediada por una proteína transportadora llamada transferrina (Vincent, 2000), uniéndose a la apocromodulina (Vincent, 2000; Castellanos y Shimada, 2018) y formando una holocromodulina (Cr<sub>4</sub>-Cromodulina), la cual se une al receptor de insulina estimulado por la insulina, amplificando la señal de la insulina y ayudándolo a mantener su conformación activa (Vincent, 2000). Una vez que se disminuyen los niveles circulantes de insulina, la cromodulina es eliminada vía urinaria (Espino, 2011; Castellanos y Shimada, 2018). El Cr se pierde parcialmente a través del cabello, en la transpiración y en la bilis (Ohh y Lee, 2005). Además, se ha mencionado un posible efecto del Cr en la síntesis de aminoácidos debido a la función insulina en la captación de aminoácidos (Ghassemi *et al.*, 2016).

El Cr, una vez consumido por los mamíferos, es transportado desde el tracto gastrointestinal a través de la transferrina por el sistema portal (Baggerman, 2017), también se ha reportado la acción de la albumina como transportador de Cr (Lashkari *et al.*, 2018). Estudios citados por Lashkari *et al.* (2018) sugieren que la absorción se realiza por difusión pasiva. Por su parte, los receptores en las superficies celulares pueden unir transferrina saturada de metales y por endocitosis libera los metales (Vincent, 2000), y posteriormente se unirá a los aminoácidos para formar la cromodulina (Baggerman, 2017). Tanto la administración oral como parenteral de iones de Cr en mamíferos, da como resultado la aparición de iones de Cr en la proteína transferrina (Vincent, 2000). Lashkari *et al.* (2018), citan diversos estudios en los cuales menciona que en rumiantes no se conocen con exactitud los mecanismos de absorción del Cr, sin embargo, reporta que la absorción del Cr en el rumen es muy baja, pudiendo recuperarse entre el 92 y 99% a nivel ruminal, sugiriendo que la absorción de Cr se lleva a cabo en la porción proximal del yeyuno.

En rumiantes es considerado un micronutriente esencial siendo un modificador metabólico (Ghassemi *et al.*, 2016).

En humanos se han diseñado varios complejos orgánicos de Cr de bajo peso molecular como posibles alternativas terapéuticas para tratar la resistencia a la insulina (Dong *et al.*, 2008). Uno de los primeros estudios realizados evaluó dos protocolos, uno de corta duración (que no tuvo efectos significativos) y uno de larga duración, en el cual se suministraban 60 µg de Cr (III) 3 veces al día con la comida, en este estudio, 3 pacientes de 6 (50%) respondieron a la suplementación con Cr, mejorando la tolerancia a la glucosa, en este estudio, el efecto del Cr sobre la tolerancia a la glucosa no fue asociado con un aumento de la glucosuria (Glinsmann y Mertz, 1966). En pacientes con pruebas de tolerancia a la glucosa normales, no se observó efecto al suministrar Cr (III) a una dosis de 150 a 1000 µg/día por periodos de 3 semanas sobre la tolerancia a la glucosa o la glucosuria (Glinsmann y Mertz, 1966). La suplementación con Cr trivalente puede mejorar la tolerancia a la glucosa dañada en humanos (Glinsmann y Mertz, 1966).

La suplementación crónica con Cr mejora la fosforilación de Akt estimulada por insulina y la translocación de GLUT4 a la membrana en adipocitos esqueléticos en ratones resistentes a la insulina (Dong *et al.*, 2008), otros estudios han demostrado en ratas obesas que la administración de 80mg/Kg PV de picolinato de Cr en el agua de bebida disminuye significativamente las concentraciones de insulina después de periodos de privación de alimento respecto al grupo control, además se demostró una disminución en los niveles de colesterol plasmático, niveles de GLUT-4 asociado a la membrana en músculo esquelético posterior a la estimulación con insulina en el grupo de ratas obesas que recibieron suplementación de picolinato de Cr respecto al grupo control; por su parte ratas obesas suplementadas con picolinato de Cr tuvieron mayores tasas de fosforilación del sustrato receptor a la insulina tipo 1 (IRS-1) respecto a ratas obesas que no recibieron suplementación de Cr, en resumen la suplementación con propionato de Cr mejora la acción de la insulina *in vivo* en ratas resistentes a la insulina, mejorando la señalización a través del receptor de insulina, aumenta la fosforilación de IRS-1

y PI-3 asociado a IRS-1, se observó actividad quinasa en músculo esquelético posterior a la estimulación de insulina en ratas obesas suplementadas con propionato de Cr respecto a ratas obesas que no fueron suplementadas (Wang *et al.*, 2006).

Dong *et al.* (2008) han reportado que la suplementación con Cr en un complejo con fenilalanina facilita la depuración de glucosa en ratones alimentados con sacarosa y observaron que la ingestión oral crónica de un complejo Cr-D-fenilalanina mejora la tolerancia a la glucosa en modelos de ratón con resistencia a la insulina alimentados con sacarosa.

El Cr es un nutriente esencial en los mamíferos para el metabolismo de los carbohidratos. La deficiencia de este mineral puede provocar una disminución en la productividad en animales (Baggerman, 2017, Espino, 2011). El Cr a través de la cromodulina aumenta la señalización de la insulina aumentando la captación de la glucosa en músculo esquelético y tejido adiposo a través de la GLUT4 que es un transportador dependiente de la insulina (Baggerman, 2017). El Cr se menciona como un componente integral del complejo molecular conocido como factor de tolerancia a la glucosa, el cual actúa facilitando la unión celular y la acción de la insulina (Depew *et al.*, 1998), se cree que actúa aumentando la señalización de la insulina (Dong *et al.*, 2008).

Las concentraciones medias de Cr en granos de cereales integrales varían entre 0.025 mg/kg de MS para la avena y 0.041 mg/kg de MS para el trigo, los forrajes cosechados presentan mayores concentraciones de Cr respecto a los concentrados, y la alfalfa en heno o ensilada (promedio de 0.522 mg/kg de MS, con un rango de 0.199 a 0.889 mg/kg de MS) presenta mayores niveles de Cr respecto al heno de pasto o ensilaje de maíz (promedio 0.220mg de Cr/kg de MS con un rango de 0.105 a 0.441 mg/kg de MS), por su parte los subproductos utilizados en la alimentación variaron desde 0.040 mg de Cr/kg de MS para cáscaras de semillas de algodón hasta 1.222 mg de Cr/kg de MS para pulpa de remolacha (Spears *et al.*, 2017), en el Cuadro 1, se presentan las concentraciones de Cr en diferentes materias primas utilizadas para la alimentación en rumiantes. En general, la mayoría

de los alimentos para rumiantes y sus ingredientes contienen menos de 0.50 mg de Cr/kg de MS, razón por la cual se puede suplementar Cr en las dietas para alcanzar a cubrir los requerimientos del mineral, es importante mencionar que una parte del Cr obtenido del análisis de ingredientes y alimentos puede provenir de contaminación tanto del suelo como del contacto con metales durante los procesos (Spears *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Concentración de cromo en principales materias primas.

<b>Ingrediente</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Media (mg/kg MS)</b>	<b>Desv. Estandar</b>	<b>Rango (mg/kg MS)</b>
<i>Concentrado</i>				
Maíz entero	16	0.026	0.015	0.008 - 0.054
Maíz procesado	16	0.049	0.031	0.014 - 0.114
Semilla de algodón	2	0.094	0.086	0.033 - 0.155
Avena entera	3	0.025	0.008	0.021 - 0.034
Soya entera	7	0.069	0.035	0.034 - 0.122
Pasta de soya	6	0.208	0.050	0.154 - 0.286
Trigo entero	6	0.041	0.014	0.029 - 0.062
<i>Forraje</i>				
Heno de alfalfa	13	0.522	0.220	0.199 - 0.889
Ensilaje de maíz	21	0.220	0.087	0.105 - 0.441
Pasto henificado	5	0.155	0.093	0.098 - 0.320
Pasto ovido	2	0.101	0.010	0.094 - 0.108
Festuca alta	4	0.179	0.074	0.112 - 0.248
Trébol blanco	2	0.358	0.046	0.325 - 0.390

(Spears *et al.*, 2017).

#### **2.1.2.1. Cromo orgánico.**

Debido a la falta de absorción del Cr en su forma inorgánica (cerca al 0.5%) (Ohh y Lee; 2005) en tracto gastrointestinal, el Cr que se suplemente a los animales debe ofrecerse en una fuente orgánica (Baggerman, 2017), ya que esta generalmente es de bajo peso molecular, lo cual aumenta su absorción intestinal respecto a las formas inorgánicas que presentan mayor peso molecular (Ohh y Lee, 2005). En sus fuentes orgánicas, el Cr se encuentra como picolinato o el nicotinato,

e incluso se llega a encontrar unido a levaduras (Castellanos y Shimada, 2018), también puede estar en forma de quelato de Cr como proteinato de Cr y quelato de Cr-metionina (Ohh y Lee, 2005). En Estados Unidos, el Cr está aprobado para la alimentación del ganado en forma de propionato de Cr en concentraciones no mayores a 0.5 mg de cromo/kg de materia seca (Baggerman, 2017; Baggerman *et al.*, 2020).

El suplementar con picolinato de Cr reduce la pérdida de peso post parto en vacas de razas cárnicas de 2 y 3 años, pero no en vacas más viejas, esta suplementación con picolinato de Cr tiende a incrementar las tasas de preñez (Stahlhut *et al.*, 2006). Por su parte, en ovejas sometidas a estrés calórico, la administración de nano-picolinato de Cr aumenta la sensibilidad a la glucosa (Hung *et al.*, 2003).

Estudios citados por Vincent (2000) mencionan que los ligandos del picolinato de Cr, pueden cambiar el potencial redox del centro crómico, de modo que puede ser reducido por agentes reductores biológicos (como el ascorbato) dando como resultado un complejo crómico con capacidad de interactuar con el oxígeno generando radical hidroxilo, llegando incluso a presentar daño significativo del ADN en estudios *in vitro* en células de individuos que consumieron picolinato de Cr por periodos prolongados. Un estudio citado por Monterrosa (2008), menciona un efecto nefrotóxico en ratas y humanos, además existen reportes de mutación en células del ovario de hámster chino por efecto del picolinato.

#### **2.1.2.1.1. Metionina de cromo.**

La metionina de Cr es una molécula de bajo peso que puede atravesar directamente la membrana celular intestinal y metabolizarse sin una digestión previa, con lo cual se ha sugerido una mayor biodisponibilidad de este quelato respecto a otras fuentes presentes en el mercado (Ohh y Lee, 2005). En una revisión de literatura Ohh y Lee (2005) citan que un quelato de metionina-Cr permanecía intacto en los microorganismos ruminales, sin embargo, los microorganismos ruminales presentan mayor absorción de Cr trivalente, lo que

puede disminuir la cantidad de Cr transportada al intestino delgado. En novillos Holstein Ghassemi *et al.* (2016) no encontraron efecto sobre la concentración de albúmina, fosfatasa alcalina, urea, calcio, creatina, glucosa, proteínas totales, triglicéridos, colesterol y perfil de ácidos grasos, así como la proporción de ácidos grasos saturados e insaturados al suplementar metionina de Cr quelada durante 4 meses; sin embargo, se vio un aumento en la concentración de lipoproteínas de alta densidad y una disminución en las lipoproteínas de baja densidad respecto al grupo que no fue suplementado con Cr. Asimismo, Ghassemi *et al.* (2016) reportaron un ligero aumento en el nivel de ácido araquidónico al suplementar metionina de Cr quelada durante los 4 meses de finalización en novillos Holstein, también observaron un aumento en los ácidos grasos poliinsaturados al suplementar metionina de Cr quelada.

#### **2.1.2.2. Cromo en bovinos.**

En ganado de engorda no se han establecido los requerimientos de Cr, en el National Research Council (NRC) de 1980, se mencionaba una concentración máxima de Cr de 1000 mg/kg de alimento en ganado bovino (Baggerman, 2017). Durante el año 2009, el Centro de Medicina Veterinaria de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos autorizó el uso de propionato de Cr como fuente de Cr para suplementar las dietas del ganado en niveles de hasta 0,5 mg de Cr/kg de MS (Spears *et al.*, 2017).

Una revisión de literatura realizada por Lashkari *et al.* (2018) resume la actividad del Cr en la nutrición de bovinos: se observa que incrementa los niveles séricos de la proteína de choque térmico 72 y la interleucina 10 con lo cual mejora el estado antioxidante y el sistema inmune, además, se reporta una mejora en la ganancia de peso, características de la canal y en vacas lecheras un aumento en la producción de leche, adicionalmente, el Cr al ser un componente activo de la cromodulina, mejora la tolerancia a la glucosa, mejora la acción y el nivel de la insulina e incrementa la gluconeogénesis.

En vacas lecheras se presentan desacuerdos en la literatura respecto al efecto de la suplementación del Cr sobre diferentes parámetros sanguíneos, por lo que se realizó un meta-análisis, en el cual no se encontró efecto al suplementar Cr sobre los niveles de glucosa, insulina en sangre, concentración de ácidos grasos no esterificados, niveles de cortisol o proteínas séricas totales durante los periodos de transición y no transición; sin embargo, los niveles de Cr si afectaron la concentración de glucagón en sangre aumentando estos niveles durante el periodo de transición, periodo en el cual también se reportó una disminución en la concentración de ácidos grasos no esterificados por efecto de la suplementación con Cr (Malik *et al.*, 2024). En bovinos se ha demostrado que la inclusión de Cr en la dieta disminuye la concentración de cortisol, además de tener un efecto inmunoestimulante (Espino, 2011), sin embargo, Depew *et al.* (1998) no observaron una disminución de las concentraciones de cortisol plasmático en terneros Holstein al suplementar 1 ppm de Cr en forma de tripicolinato.

Baggerman (2017), menciona que el propionato de Cr mejora la eficiencia de la GLUT4 en el transporte al interior de la célula de la glucosa circulante mejorando la tasa de crecimiento en novillos de engorda.

La adición de picolinato de cromo en dietas de becerras disminuye los niveles de glucosa circulante (Castellanos y Shimada, 2018). Por su parte en pruebas de sensibilidad a la insulina en ganado en crecimiento, las concentraciones séricas de insulina posteriores a la infusión de glucosa fueron menores en vaquillas suplementadas con Cr (propionato de cromo) respecto a los animales que no fueron suplementados, con lo cual se concluye que la suplementación con propionato de Cr aumenta la sensibilidad a nivel tisular a la insulina en vaquillas en crecimiento (Spears *et al.*, 2012). Por su parte, Depew *et al.* (1998) no observaron efecto sobre la tasa de depuración de la glucosa ni en las concentraciones de glucosa en el área bajo la curva en pruebas de tolerancia a la glucosa ni sobre las concentraciones plasmáticas del factor de crecimiento similar a la insulina-1 posteriores al suministro de tripicolinato de Cr en terneros Holstein, sin embargo, si observaron que la suplementación con 1 ppm de Cr en forma de tripicolinato de Cr tuvo un efecto sobre

los ácidos grasos no esterificados, disminuyendo su concentración plasmática respecto al grupo que no recibió suplementación de Cr durante las primeras 5 semanas de edad, lo cual sugiere una mayor sensibilidad a la insulina en los animales suplementados con Cr.

Spears (*et al.*, 2012) observaron que, en novillas en crecimiento suplementadas con cromo, las concentraciones de insulina posteriores a una infusión de glucosa fueron menores respecto al grupo control. La diferencia apareció como tendencia a los 10 minutos y fue significativa a los 15 minutos, desapareciendo a los 45 minutos. Asimismo, el área bajo la curva de respuesta insulínica fue consistentemente menor en los animales suplementados, lo que sugiere una mejora en la sensibilidad a la insulina durante los primeros minutos posteriores a la infusión de glucosa (Figura 1).

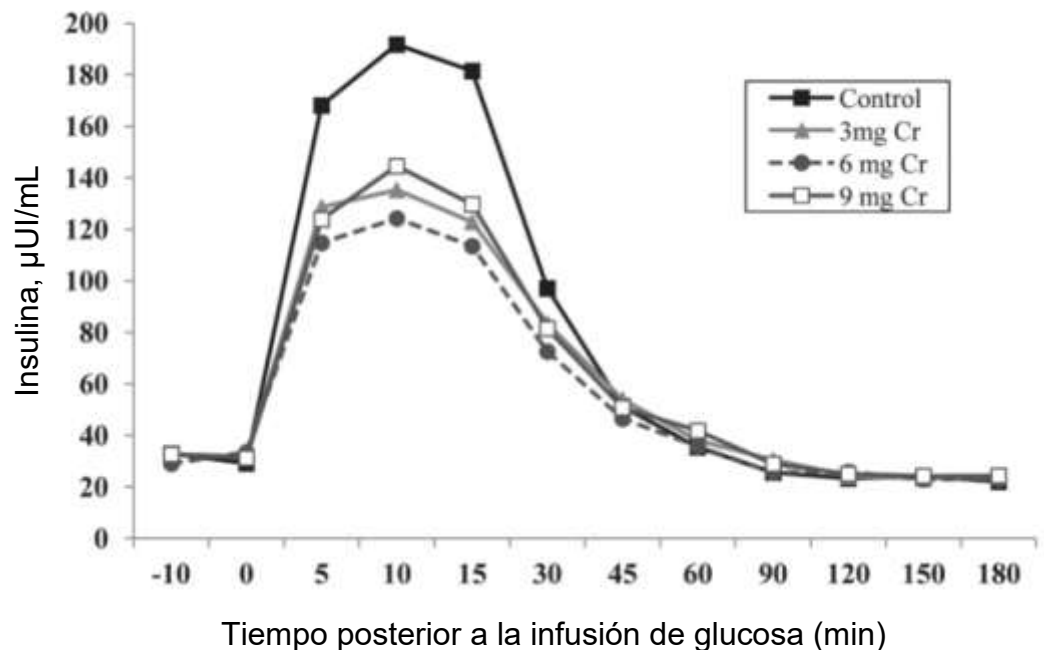


Figura 1. Efecto de la suplementación de propionato de Cr en la dieta sobre la concentración sérica de insulina en vaquillas posterior a una prueba de tolerancia a la glucosa (Spears *et al.*, 2012).

Spears *et al.* (2012) mencionan que vaquillas del grupo control tuvieron concentraciones de glucosa sérica más bajas a los 60, 90 y 120 minutos después de la infusión con glucosa que las suplementadas con Cr (Figura 2). Un estudio realizado por Baggerman *et al.* (2020) en novillos suplementados con propionato de Cr, reporta una mayor eficiencia en la captación de glucosa por parte de las fibras musculares esqueléticas, con lo cual requeriría menos transportadores de glucosa en la superficie de la fibra.

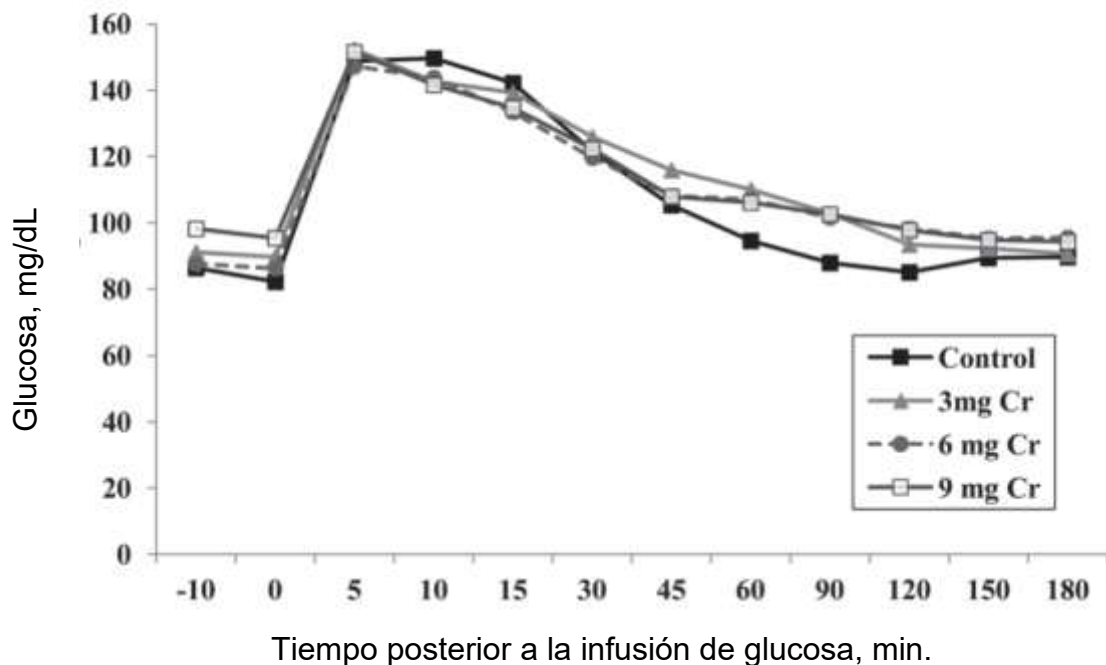


Figura 2. Efecto de la suplementación de propionato de cromo en la dieta sobre la concentración sérica de glucosa en vaquillas posterior a una prueba de tolerancia a la glucosa (Spears *et al.*, 2012).

El suministrar propionato de Cr ayuda a bovinos en crecimiento a tener una mejor tasa de depuración de la glucosa respecto a animales no suplementados durante pruebas de sensibilidad a la insulina en ganado en crecimiento, así mismo, el propionato de Cr se cree que aumenta la entrada de glucosa endógena a la

sangre (Spears *et al.*, 2012). Otros estudios han demostrado el efecto lineal en la ganancia diaria de peso, así como en la conversión alimenticia y en el peso de la canal caliente en novillos al suplementar diferentes dosis de propionato de Cr, sin tener un efecto sobre el consumo de materia seca (Baggerman *et al.*, 2020).

En terneros Holstein en crecimiento, no se observó ningún efecto al suministrar 1 ppm de Cr en forma de tripicolinato sobre la ganancia diaria de peso ni sobre el consumo de alimento respecto al grupo que no recibió suplementación, aunque si observaron una mayor tasa de crecimiento de los machos suplementados con 1ppm de Cr en forma de tripicolinato de Cr respecto al grupo que no recibió suplementación de cromo (Depew *et al.*, 1998).

La adición de Cr orgánico ha tenido efectos benéficos durante el periodo de recepción del ganado al corral de engorda (Espino, 2011), ya que ha presentado una mejora en el consumo de alimento y en la inmunidad del ganado (Castellanos y Shimada, 2018). Un estudio realizado por Smock *et al.* (2020) menciona que la suplementación de propionato de Cr reduce la morbilidad de enfermedades respiratorias en novillos durante el periodo de recepción.

Espino (2011) encontró un aumento del 3.5% en el peso corporal y un aumento 12.5% en la ganancia diaria de peso de bovinos cárnicos al adicionar 0.15 mg de Propionato de Cr/kg de materia seca respecto al grupo testigo durante los primeros 77 días de arribo al corral de engorda. Durante el periodo de finalización (día 78 al 189 de la engorda), los bovinos que fueron suplementados con propionato de Cr presentaron una tendencia a aumentar en 11% la ganancia diaria de peso. Sin embargo; el consumo de alimento y la conversión alimenticia no fueron afectados por la adición del suplemento. Además, se observó un aumento del 5% en el peso de la canal al adicionar 0.15 mg de Propionato de Cr/kg de materia seca respecto al grupo testigo, parámetros como el rendimiento en canal, el espesor de la grasa dorsal, grasa de riñonada, grasa pélvica y grasa alrededor del corazón, grado de marmoleo o área del ojo de la chuleta no fueron afectadas. Monterrosa (2008) observó que suplementar ganado bovino con 0.4 ppm de Cr en forma de metionina de Cr durante 32 días previos a la matanza en dietas adicionadas con

clorhidrato de zilpaterol, tenía un efecto positivo sobre el comportamiento productivo, baja la concentración de cortisol y no se afectan las características de la canal.

Se ha reportado un aumento en la energía neta retenida (Mcal/kg) tanto de mantenimiento como de ganancia en bovinos de engorda al ser suplementados durante 32 días previos a la matanza con 0.4 ppm de Cr en forma de metionina de Cr respecto al grupo control y un grupo suplementado con 0.2 ppm de Cr en forma de metionina de Cr (Monterrosa, 2008).

Se ha demostrado que el Cr tiene un efecto modulador del estrés en bovinos, especialmente cuando se administra en forma de metionina de Cr. Estudios reportan que la inclusión de 0.2 y 0.4 ppm de este compuesto en la dieta reduce significativamente las concentraciones de cortisol al momento de la matanza, este efecto se ha observado en animales suplementados durante el periodo de finalización, específicamente en los 32 días previos al sacrificio, alimentados con dietas que incluyen clorhidrato de Zilpaterol. (Monterrosa, 2008).

La deficiencia de Cr llega a caracterizarse por un aumento en la secreción de insulina, estados de estrés en los animales, lo que lleva a una disminución en el consumo de alimento, afectaciones en el metabolismo y estados de inmunosupresión (Jiménez *et al.*, 2014).

### **2.1.3. Zinc.**

El zinc (Zn) es importante para el desarrollo el crecimiento de los organismos (Monroy, 1986). Se encuentra en alrededor de 300 enzimas (Castellanos y Shimada, 2018) principalmente metaloenzimas como la anhidrasa carbónica, la fosfatasa alcalina, carboxipeptidasas A y B diferentes deshidrogenasas (McDonald *et al.*, 2006; Castellanos y Shimada, 2018), entre las que se encuentran la deshidrogenasa láctica y la deshidrogenasa alcohólica (Castellanos y Shimada, 2018), también forma parte de la insulina, ribonucleasa y DNA polimerasa con la cual desempeña un efecto regulador (McDonald *et al.*, 2006) actuando en la configuración del DNA y del RNA (Church *et al.*, 2002), controlando la replicación y

la diferenciación celular al actuar durante el proceso de transcripción (McDonald *et al.*, 2006). Interviene en la síntesis y metabolismo de proteínas (Church *et al.*, 2002), diversos artículos citados por Carmichael *et al.*, (2020) sugieren que durante periodos de crecimiento rápido como los que se presentan cuando el ganado es suplementado con  $\beta$ -agonistas adrenérgicos o dietas con mayor densidad energética, los animales requieran un mayor aporte de Zn para promover la acumulación de proteínas. Otras funciones del Zn son reparación tejidos con daños, tiene efecto sobre el sistema inmune, interviene en el proceso de elaboración de la queratina (Hutjens, 2003). En general, el Zn participa en la replicación y transcripción del ADN, aumenta la expresión del gen de la colecistoquinina pancreática y de la leptina, es parte estructural de la fosfolipasa A<sub>2</sub> pancreática, con lo que participa en la absorción de las grasas (Castellanos y Shimada, 2018), además actúa como antioxidante, ya que forma parte de la superóxido dismutasa (Castellanos y Shimada, 2018; Oconitrillo *et al.*, 2024), se ha demostrado su efecto antioxidante en borregos, dónde suplementados con diferentes niveles de Zn mejora el poder reductor antioxidante férrico a nivel ruminal y sanguíneo (Alijani *et al.*, 2020).

El Zn se encuentra presente en diferentes partes del cuerpo como los dientes, pelo, ojos, glándula adrenal, riñones, pituitaria, páncreas, hígado (Suárez, 2023), siendo en hueso y músculo esquelético dónde se encuentra principalmente mientras que los niveles plasmáticos y séricos representan menos del 1% del zinc corporal total (Duffy *et al.*, 2023).

El Zn se absorbe a nivel intestinal cómo un catión divalente ( $\text{Zn}^{2+}$ ) dónde puede existir unido a proteína o en forma lábil, la tasa de absorción varía dependiendo su necesidad, con lo cual las pruebas que trabajan niveles elevados de Zn pueden subestimar los valores (Underwood y Suttle, 2003). En ratas, la absorción del Zn es muy rápida (usando asas duodenales ligadas se observó que 1% de una dosis de 5  $\mu\text{g}$  se transfiere al cadáver 1 minuto posterior a una aplicación intraluminal) y se lleva a cabo principalmente a nivel del duodeno dónde se absorbe el 60%, seguido del íleon con un 30% y a nivel de yeyuno únicamente un 10%

(Davies, 1980). Diversos estudios citados por Krebs (2000) mencionan al duodeno en su parte distal o el yeyuno en su parte proximal como el principal sitio de absorción de Zn en humanos. Estudios en ratas demostraron que la absorción de Zn es a través de transportador o de procesos enzimáticos y se lleva a cabo en dos fases, la primera fase es rápida, durante los primeros 30 minutos, una parte del Zn es transferida al cuerpo, mientras que, a partir de los 30 minutos hasta las 6 horas, la velocidad de transferencia del Zn al cuerpo es más lenta (Davies, 1980). En bovinos, la absorción del Zn se lleva a cabo en el abomaso, en el intestino delgado y en la parte craneal del intestino grueso (Suárez, 2023). Una revisión de literatura llevada a cabo por Duffy *et al* (2023) reporta que el Zn lábil se transporta al citosol utilizando transportadores especializados de la familia ZIP, una vez dentro del citosol el Zn es secuestrado por proteínas transportadoras como la metalotioneína y exportado por proteínas ZnT. Una revisión de literatura realizada por Krebs (2000) menciona que los transportadores de Zn se han clasificado como ZnT<sup>3</sup>, de los cuales el ZnT<sup>1</sup> se ha encontrado presente en las vellosidades del intestino delgado proximal, aumentando su expresión en ratas como respuesta a una suplementación con Zn, otras proteínas relacionadas con la regulación de la absorción del Zn son la metalotioneína (proteína intracelular transportadora de metales), la cual se sintetiza a nivel hepático e intestinal y su producción se estimula mediante la suplementación de Zn, la inyección intraperitoneal de Zn, inflamación, entre otras, dicha metalotioneína puede limitar las concentraciones de Zn libre y funcionar como reservas de Zn. En esta misma revisión de literatura, se menciona DCT1 como otro transportador potencialmente involucrado en la captación de zinc y otros minerales, el cual se encuentra presente en duodeno en las criptas y vellosidades.

Por otra parte, un artículo de revisión realizado por Krebs (2000) establece que el mecanismo de homeostasis del Zn primeramente es mantenido a nivel del tracto gastrointestinal principalmente intestino delgado, hígado y páncreas a través del proceso de absorción de Zn exógeno y la secreción y excreción gastrointestinal de Zn endógeno.

Los fitatos presentes en los granos, forman complejos con el Zn a nivel intestinal que no pueden ser absorbidos, dicho grado de interacción del complejo fitato-Zn van a depender del nivel de inclusión de calcio en la dieta, teniendo un efecto inversamente proporcional entre el nivel de calcio en la dieta y la absorción de Zn (Underwood y Suttle, 2003). Una extensa revisión de literatura realizada por Duffy *et al.* (2023) menciona que la absorción de Zn en forma de catión se reduce por la presencia de otros cationes divalentes como el cadmio, cobre, magnesio, calcio, níquel y hierro, además, se ha reportado correlaciones positivas entre los niveles de Zn, hierro y cadmio principalmente en el hueso. Por otro lado, Krebs (2000) reporta que tanto la leche materna, el estado nutricional del Zn y la etapa fisiológica pueden afectar la absorción del Zn.

Las deficiencias de Zn en la mayoría de especies tienen mayor impacto en tejidos con alta tasa de recambio celular (por ejemplo, la piel, tracto gastrointestinal y sistema inmune) (Duffy *et al.*, 2023), generando inapetencia (Underwood y Suttle, 2003; Jiménez *et al.*, 2014; Duffy *et al.*, 2023), dicha inapetencia puede resultar en deformidades esqueléticas en animales en crecimiento (Duffy *et al.*, 2023) en cerdos, aves, corderos y terneros se caracteriza además por disminución del crecimiento, problemas reproductivos (Underwood y Suttle, 2003; Jiménez *et al.*, 2014) puede presentar problemas de coloración del pelo, alopecia y paraqueratosis (Jiménez *et al.*, 2014). Duffy *et al.* (2023) citan diversos artículos donde se menciona hipogonadismo, en terneros, niños y corderos o inmunopatologías incluida atrofia del timo y depleción linfocitaria en terneros, en vacas se ha reportado infertilidad, abortos, retención placentaria, en toros y borregos se ha observado disminución de la producción de testosterona y menor desarrollo gonadal.

A pesar de ser poco común la intoxicación con Zn en animales de abasto (Duffy *et al.*, 2023), dosis de 500 ppm en animales jóvenes y 1000 ppm en animales maduros, provoca toxicidad, la cual se caracteriza por estiramiento de los miembros locomotores, convulsión y opistótonos (Jiménez *et al.*, 2014). Una revisión de literatura realizada por Duffy *et al.* (2023) menciona que los signos de intoxicación de zinc en rumiantes se caracterizan por una disminución del apetito y de la

eficiencia alimenticia, pérdida de peso, diarrea, lesiones en el páncreas, neumonía, también se llegan a presentar signos, neurológicos y oculares.

Diversos estudios citados por Duffy *et al.* (2023) mencionan el rol del zinc como un elemento esencial en las bacterias que constituyen el microbioma en los seres vivos, donde las proteínas que se unen al zinc constituyen alrededor del 5% del proteoma bacteriano, además la microbiota consume alrededor del 20% del zinc dietético consumido por el hospedador, sin embargo, dosis excesivas de zinc tienen efectos citotóxicos en las células bacterianas debido a que los iones libres de zinc compiten de forma activa con otros minerales en centros enzimáticos activos dando como resultado la inactivación de algunas enzimas. Es importante mencionar que en esta misma revisión de bibliografía Duffy *et al.* (2023) indican que algunas bacterias han desarrollado mecanismos de defensa contra las altas concentraciones de minerales y se ha reportado que algunos genes de resistencia a los minerales (como el zinc) están físicamente ligados a los genes de resistencia a los antimicrobianos a nivel de los cromosomas o en algunos elementos genéticos móviles, los autores citan varios artículos donde se observa esta relación en genes de resistencia donde animales suplementados con zinc en la dieta presentaron *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) debido a la presencia de genes de resistencia al zinc *czrC* en el elemento SCCmec que codifica la resistencia a la meticilina que caracteriza las cepas SARM, esto se ha reportado en cerdos, ganado, aves de engorda y en personas expuestas a estos animales.

#### **2.1.3.1. Zinc orgánico.**

Históricamente, las fuentes inorgánicas de Zn como el óxido de Zn y el sulfato de Zn han sido utilizadas para la suplementación, sin embargo, las fuentes orgánicas han ido ganando atención debido a que presentan mayor biodisponibilidad y mayores beneficios para los animales (Anam *et al.*, 2023). Diferentes artículos citados por Duffy *et al.* (2023) mencionan que las formas inorgánicas de Zn son las más utilizadas, pero las formas orgánicas son las que aparentemente tienen mayor biodisponibilidad. Dicha suplementación con Zn en

formas orgánicas, pueden mejorar la calidad de la canal y la calidad de la carne y la salud de las pezuñas (Kessler *et al.*, 2003).

La fuente de Zn influye sobre las concentraciones plasmáticas de Zn; ganado alimentado durante los 14 días previos a la matanza con 500 mg/kg de materia seca de zinc en forma de proteinato de Zn y ganado alimentado con 500 mg/kg de materia seca de Zn (50% en forma de proteinato y 50% en forma de ZnSO<sub>4</sub>) presentaron mayores concentraciones plasmáticas de Zn que el ganado alimentado con 500 mg/kg de materia seca de Zn en forma de ZnSO<sub>4</sub>, de igual forma, el ganado alimentado durante los 14 días previos a la matanza con 500 mg/kg de materia seca de Zn en forma de proteinato presentaron mayores niveles de Zn a nivel de hígado que los alimentados con una fuente inorgánica de zinc (Wright y Spears, 2004). Se ha reportado que la suplementación con propionato de Zn en la dieta de finalización regula los niveles de receptores  $\beta$ -adrenérgicos ( $\beta$ -2 y  $\beta$ -3) (Wellmann *et al.*, 2020). Estudios realizados por Kessler *et al.* (2003) en novillos a partir de los 350 kg, observaron una tendencia a tener mayores tasas de crecimiento al suplementar óxido de Zn o un complejo de Zn con un polisacárido respecto a bovinos que no recibieron suplementación con Zn o que fueron suplementados con un proteinato de Zn. Sin embargo, en el mismo estudio conducido en bovinos desde los 146 kg de peso hasta la matanza (509 – 531 kg) no observaron diferencias sobre ganancia de peso, conversión alimenticia ni características de la canal al suplementar a los animales con diferentes fuentes de Zn (óxido de Zn, proteinato o polisacárido o sin suplementación). La adición con propionato de Zn mejora el rendimiento y el crecimiento en bovinos durante la fase de finalización suplementados con clorhidrato de ractopamina, lo cual se cree es debido a un cambio en la utilización de recursos de la lipogénesis para el mantenimiento muscular y de la hipertrofia (Wellmann *et al.*, 2020).

La suplementación con Zn a una dosis de 360 mg/día mejora la respuesta inmune celular, así como la respuesta de anticuerpos a vacunas comerciales principalmente en animales suplementados con un complejo de Zn y aminoácidos (Kegley *et al.*, 2001).

#### **2.1.3.1.1. Metionina de zinc.**

Un aumento lineal en el consumo de materia seca se ha observado en vacas lecheras suplementadas con diferentes niveles de metionina de zinc durante los 60 días previos al parto, asimismo, además de aumento lineal en las concentraciones de IgA e IgM en el calostro de las vacas (Chen *et al.*, 2020).

Pruebas *in vitro* utilizando líquido ruminal de bovino demostraron que la suplementación con diferentes niveles de metionina de Zn tiene una mejoría lineal sobre la actividad de la amilasa, de la carboxi metil celulasa y la proteasa siendo los grupos suplementados con 60 y 90 mg de Zn/kg de MS los que presentaron un mayor nivel de actividad de la amilasa respecto al grupo control (sin suplementar) y al grupo suplementado con 30 mg de Zn/kg de MS (Anam *et al.*, 2023).

Estudios *in vivo* demostraron una disminución en la concentración ruminal de amoníaco vacas (Chen *et al.*, 2020), lo cual también fue reportado por Alijani *et al.* (2020) que observaron una disminución en la concentración de amoníaco a nivel ruminal en borregos suplementados con diferentes fuentes de Zn respecto al grupo control que no recibió suplementación. También se ha reportado un aumento en las concentraciones de AGV's y un aumento lineal en las concentraciones de proteína microbiana en vacas lecheras alimentadas con 20, 40 o 60 miligramos/kg MS de metionina de Zn durante los 60 días previos al parto, por su parte se observó un efecto lineal al disminuir la IL-1, aumentar la IL-2 y una tendencia a aumentar la IL-6 en los niveles sanguíneos de las vacas (Chen *et al.*, 2020). Anam *et al.* (2023) haciendo pruebas *in vitro*, obtuvieron un efecto lineal al suministrar diferentes niveles de metionina de Zn (30, 60 y 90 mg/kg de MS de Zn) respecto al grupo control (sin suplementar) sobre la concentración de ácidos grasos volátiles, además de que los grupos suplementados con 60 y 90 mg/kg de metionina de Zn/kg de MS demostraron un efecto lineal sobre el grupo control (no suplementado) sobre la concentración de proteína microbiana.

Posterior a una incubación y pruebas *in vitro*, la suplementación de 30, 60 y 90 mg/kg de MS de zinc en forma de metionina de zinc, han demostrado tener efectos lineales y cuadráticos sobre la producción de gas a diferentes horarios de

muestreo, observando un efecto lineal a las 24 horas y un efecto cuadrático a las 36 horas post incubación; mientras que la producción de metano no se vio afectada por la suplementación con zinc en la dieta (Anam *et al.*, 2023).

La suplementación con 60 y 90 mg/kg de MS de zinc en forma de metionina de zinc mejora de forma lineal la digestibilidad *in vitro* de la materia seca y de la materia orgánica respecto al grupo control (sin suplementar zinc) (Anam *et al.*, 2023), lo cual también fue observado en borregos suplementados con metionina de zinc, donde se mejoró la digestibilidad de la materia seca respecto a ovinos que no recibieron suplementación (Alijani *et al.*, 2020). La suplementación con metionina de zinc además mejora de forma lineal la digestibilidad de la proteína cruda y de la fibra cruda a las 48 horas de incubación respecto al grupo control (Anam *et al.*, 2023). Novillas cárnicas suplementadas con una combinación de metionina de zinc y sulfato de zinc presentaron una mejor respuesta a enfermedad respiratoria, con una disminución en la severidad de las lesiones nasales y de fiebre, por su parte, animales suplementados con dosis altas de sulfato de zinc presentaron fiebre y un mayor efecto de enfermedad respiratoria (Broadway *et al.*, 2021).

Estudios realizados en borregos, han demostrado un aumento en la capacidad de absorción de zinc en animales suplementados con metionina de zinc y con nano partículas de zinc respecto a los ovinos que fueron suplementados con óxido de zinc (Alijani *et al.*, 2020).

La suplementación con metionina de zinc, aumenta el consumo de materia seca en ovejas respecto a ovejas que no recibieron suplementación de zinc, además la suplementación con metionina de zinc mejora la ganancia diaria de peso y la eficiencia alimenticia en borregos respecto a borregos que no reciben suplementación, los datos de ganancia diaria de peso y eficiencia alimenticia no son afectados por la fuente de zinc que se suplemente (óxido de zinc, metionina de zinc o una fuente de nano partículas de zinc), pero si son diferentes al grupo control (Alijani *et al.*, 2020).

En borregos suplementados con metionina de zinc y con nanopartículas de óxido zinc, presentaron un mayor poder antioxidante férrico que los animales que

recibieron óxido de zinc suplementado y animales que no recibieron suplementación, por su parte el grupo suplementado con óxido de zinc tuvo mayor poder antioxidante que los animales que no fueron suplementados con zinc (Alijani *et al.*, 2020).

#### **2.1.3.2. Zinc en bovinos.**

La presencia de fitatos de origen vegetal en el rumen puede formar complejos con el zinc, los cuales no son absorbidos en rumen, disminuyendo la tasa de absorción del zinc, sin embargo, en rumiantes adultos existe la hidrólisis del fitato en rumen, por lo tanto, los terneros pre rumiantes son los que pueden presentar menor disponibilidad de zinc al ser alimentados por un sustituto lácteo y con proteínas de semilla de soya (Underwood y Suttle, 2003).

Estudios *in vitro* utilizando líquido ruminal de bovino, han demostrado que la adición de metionina de zinc aumenta la producción de ácidos grasos volátiles, la actividad de la carboximetil-celulasa y la producción de gas, por su parte dosis altas y medias (60 y 90 mg/kg de zinc) de una metionina de zinc incrementaron la actividad de amilasa, proteasa, además aumentaron la proteína microbiana, digestibilidad, digestibilidad de la materia orgánica, digestibilidad de la proteína cruda y de la fibra curda, respecto al grupo que no recibió metionina de zinc (Anam *et al.*, 2023).

La suplementación con metionina de zinc ha demostrado reducir la incidencia de diarreas y mejorado la ganancia diaria de peso y la eficiencia alimenticia a partir de la segunda semana de nacimiento en becerras Holstein recién nacidas respecto al grupo que no recibió suplementación de Zinc, además de mejorar la integridad de la mucosa intestinal debido a que estimula el crecimiento de las vellosidades del íleon y la expresión de ARNm que codifica las proteínas de unión tisular como la claudin-1, ocludina y ZO-1 (Ma *et al.*, 2020). El zinc es un mineral traza esencial necesario para la producción de leche y para mantener la salud en vacas lecheras (Oconitrillo *et al.*, 2024).

Se ha reportado un efecto de la suplementación de zinc a diferentes dosis durante los periodos de máxima liberación de hormonas en vaquillas en corral de engorda tratadas con diferentes programas de implantes (Messersmith *et al.*, 2021). Además, se ha observado que subir de 76 a 97mg/Kg MS de Zinc, se disminuye el consumo de materia seca aproximadamente 1 kg al día, sin embargo, se mejora la producción de leche posterior al pico de lactancia en vacas lecheras de raza Holstein (Oconitrillo *et al.*, 2024). Se ha observado un mayor peso corporal en novillos Angus que recibieron suplementación con zinc a través de diferentes fuentes respecto a animales que no recibieron suplementación con zinc (Carmichael *et al.*, 2020). Se ha reportado que el zinc está involucrado en la señalización y activación de receptores  $\beta$ -agonista a nivel celular (Chanda *et al.*, 2020).

La deficiencia de zinc en rumiantes afecta el crecimiento microbiano a nivel ruminal, limitando la degradación de alimento (Anam *et al.*, 2023).

## **2.2. Aminoácidos.**

Los aminoácidos son moléculas orgánicas que poseen al menos un grupo carboxilo y un grupo amino (Boyer, 2000). El primero descubierto fue la asparagina en 1806 (Lehninger *et al.*, 1993). Se han identificado más de 200 aminoácidos en organismos vivos (Horton *et al.*, 2008), aunque algunos autores mencionan cerca de 300 (Bohinski, 1998), muchos de los cuales son específicos de ciertas especies.

Solo 20 aminoácidos se consideran comunes o estándar, y se encuentran en todos los organismos para la formación de proteínas (Lehninger *et al.*, 1993; Rodwell, 1997; Bohinski, 1998; Boyer, 2000; Horton *et al.*, 2008). Estos son sólidos blancos, cristalinos, solubles en agua e insolubles en solventes orgánicos (Boyer, 2000). Su estructura general (Figura 3) incluye un carbono  $\alpha$  unido a un grupo amino, un grupo carboxilo, un hidrógeno y un radical (R), que determina sus propiedades únicas (Lehninger *et al.*, 1993; Conn *et al.*, 1996; Rodwell, 1997; Bohinski, 1998; Boyer, 2000; Horton *et al.*, 2008). Los nombres de algunos aminoácidos provienen de su fuente de origen, como la asparagina (espárragos) o la glicina (de sabor dulce) (Lehninger *et al.*, 1993).

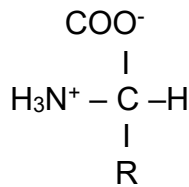


Figura 3. Estructura general de los aminoácidos (Horton *et al.*, 2008).

Los aminoácidos son esenciales en funciones celulares como la transmisión de impulsos nerviosos, desarrollo celular, y formación de urea y otras biomoléculas (Rodwell, 1997). De los 20 aminoácidos, 19 son quirales, a excepción de la glicina (Lehninger *et al.*, 1993; Bohinski, 1998; Rodwell, 1997; Boyer, 2000; Horton *et al.*, 2008). La quiralidad permite isomería D y L, siendo la L la más común en proteínas (Horton *et al.*, 2008; Boyer, 2000). Algunos D-aminoácidos se encuentran en bacterias y antibióticos como la gramicidina-S y la actinomicina D (Bohinski, 1998; Conn *et al.*, 1996).

Se clasifican según su cadena lateral en:

- Alifáticos: alanina, valina, leucina, isoleucina (Horton *et al.*, 2008; Bohinski, 1998)
- Aromáticos: fenilalanina, tirosina, triptófano (Horton *et al.*, 2008).
- Sulfurados: metionina, cisteína (Horton *et al.*, 2008; Bohinski, 1998).
- Alcoholes: serina, treonina (Horton *et al.*, 2008; Bohinski, 1998).
- Básicos: histidina, lisina, arginina (Horton *et al.*, 2008).
- Ácidos: ácido aspártico y ácido glutámico (Horton *et al.*, 2008).
- Amidas: asparagina, glutamina (Horton *et al.*, 2008).

Otra clasificación se basa en la reactividad y polaridad de las cadenas laterales (Boyer, 2000), dividiéndolos en:

1. No polares: hidrofóbicos (ej. alanina, leucina, triptófano)
2. Polares sin carga: forman puentes de hidrógeno (ej. serina, tirosina, cisteína)
3. Ácidos: con carga negativa (ej. ácido glutámico)
4. Básicos: con carga positiva (ej. arginina)

### 2.2.1. Metionina.

La metionina es un aminoácido esencial con un grupo azufrado y un grupo metilo en su cadena lateral (Horton *et al.*, 2008). Se representa con la letra “M” y es un aminoácido neutro (Bohinski, 1998). La Figura 4 presenta la estructura de la metionina.

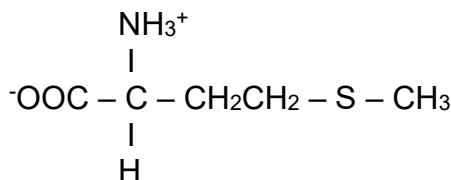


Figura 4. Estructura de la metionina.

En plantas y bacterias, puede formarse a partir de cisteína mediante transulfuración, pero en animales ocurre lo contrario (Conn *et al.*, 1996). Es importante en la síntesis de proteínas siendo generalmente el primer aminoácido de los polipéptidos (Horton *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2024). En bacterias, se modifica a N-formilmetionina (Horton *et al.*, 2008). También participa en la gluconeogénesis (Mora y Shimada, 2018) y en la respuesta antioxidante en rumiantes (Liu *et al.*, 2024).

#### 2.2.1.1. Metionina en bovinos.

La metionina se ha reportado que mejora la tasa de crecimiento y la calidad de la carne del ganado durante la época de verano (Park *et al.*, 2020), por su parte diversos estudios citados por Torrentera *et al.* (2017) sobre la estimación de los requerimientos de aminoácidos, así como de retención de nitrógeno, mencionan a la metionina como el principal aminoácido limitante en ganado en crecimiento seguida por la lisina. Otros estudios reportan que la lisina es el principal aminoácido limitante seguido de la metionina en ganado alimentado a base de concentrados (Baggerman *et al.*, 2021). En ganado lechero, las dietas con ensilaje de maíz y pastos suelen tener bajos niveles de metionina y lisina (Hutjens, 2003), por su parte diversos estudios citados por Cantalapiedra *et al.* (2020), mencionan que la proteína

microbiana ruminal presenta bajos niveles de metionina, presentándose en una relación con la lisina de 3 de lisina: 5 de metionina, mientras que para ganado lechero se ha establecido una relación de 2 de lisina a 9 de metionina, debido a esto, la metionina se ha clasificado como el principal aminoácido limitante en rumiantes alimentados con proteínas principalmente de origen microbiano y en bovinos de engorde alimentados con dietas altas en forraje. En vacas lecheras en transición, la suplementación de metionina ha mejorado la respuesta inmune (Grant *et al.*, 2022). En terneros Holstein en crecimiento, han demostrado que la adición de metionina en la dieta resulta en una mejor eficiencia productiva y en la energía dietética estimada, además de un efecto lineal aumentando los niveles plasmáticos de metionina y arginina (Torretera *et al.*, 2017), sin embargo, la adición de metionina protegida no mejoró el comportamiento productivo en terneros Holstein durante los 112 días iniciales de engorde en corral (Salinas *et al.*, 2024). Por su parte, la suplementación con una metionina protegida en novillas cruzadas durante el periodo de recepción en corral de engorde redujo los niveles de haptoglobina respecto a novillas que no recibieron suplementación, lo cual sugiere un efecto antiinflamatorio a nivel fisiológico (Grant *et al.*, 2022). Un estudio realizado en toretes Charolais, reportó un aumento en la tasa de crecimiento en animales alimentados con dietas balanceadas en metionina al 2.6% de proteína metabolizable, además de que aumentó en un 5% la proporción de tejido adiposo total de la canal y disminuyó la muscular en un 0.8% (Cantalapiedra *et al.*, 2020).

En novillos Holstein canulados, se observó un efecto lineal, aumentando la digestión de nitrógeno post ruminal al aumentar los niveles de metionina suplementaria en la dieta, además de que el suministrar metionina en la dieta aumenta el flujo duodenal de metionina (Torretera *et al.*, 2017).

La capacidad antioxidante total se aumentó con la adición de 0.25%/kg de MS de N-acetil-L-metionina como fuente de metionina protegida respecto a un grupo control (sin suplementación) en novillas Angus, en general, la suplementación con N-acetil-L-metionina, mejora la calidad de la carne potenciando el efecto antioxidante de lípidos y proteínas, mejorando el color y la capacidad de retención

de agua (Liu *et al.*, 2024). La suplementación con metionina protegida en novillos criollos aumentó la proporción de fibras MHC-1 después de 56 días de suplementación, además se incrementó la densidad de mionúcleos en un 66% (Baggerman *et al.*, 2021).

El correcto balance de metionina en dietas ricas en forraje mejora la tasa de crecimiento en toros Charolais, teniendo un efecto mayor en dietas con niveles altos de proteína, además se sugiere una mayor retención de nitrógeno (Cantalapiedra *et al.*, 2020).

#### **2.2.1.2. Interacción metionina-cromo y zinc.**

Al momento de desarrollar nuevos suplementos minerales para alimentos, debe tomarse en cuenta el papel que cada microelemento desempeña en las funciones vitales de los organismos, así como la estrecha relación que existe entre cada uno de estos (Farionik *et al.*, 2023). La metionina es un aminoácido específico y limitante, al combinarse con minerales, para una mayor estabilidad, los minerales se unen al oxígeno carboxilado de la metionina, proceso de síntesis que se lleva a cabo a un pH menor a 5, con lo cual se reduce la interacción de los minerales en el tracto gastrointestinal, aumentando la absorción de los minerales, manteniendo su estabilidad en el pH del sistema digestivo, garantizando su disponibilidad en el animal (Global Animal Products).

Vellini *et al.* (2020) al suplementar un complejo metionina de cromo y una fuente de zinc inorgánico adicionado con una fuente de zinc conjugado con aminoácidos, mejoró la eficiencia alimenticia en toros Nelore respecto a los grupos que consumieron una fuente inorgánica de zinc y animales que consumieron una fuente inorgánica de zinc suplementada con una fuente orgánica de zinc, además de presentar mayor terneza que animales suplementados con óxido de zinc en cortes añejados durante 28 días.

La suplementación con 3mg/kg de cromo orgánico (en forma de metionina de cromo) y 40 mg/kg de zinc orgánico (quelato de zinc de lisina y ácido glutámico) solos o en combinación en machos cabríos de raza Zarabi durante la etapa de

crecimiento, mejoró el peso final, la ganancia diaria de peso, la ganancia de peso total y la conversión alimenticia respecto al grupo que no recibió suplementación, el consumo de materia seca fue mayor para el grupo suplementado con 40mg de Zn respecto al grupo control y al grupo suplementado con cromo, siendo similar al grupo suplementado con la combinación de Cr y Zn orgánicos. Los animales suplementados con la combinación de Cr y Zn orgánicos presentaron consumos de materia seca similares a los otros grupos; además se observó un efecto antioxidante al suministrar cromo y zinc orgánicos, adicionalmente se presentó una mejoría en los coeficientes de digestibilidad respecto al grupo control (Tantawi *et al.*, 2023).

### **III. HIPÓTESIS.**

El incremento del nivel de incorporación de 3.6 a 10.8 g de un complejo de Metionina-Cromo-Zinc (CMCZ) en la dieta para bovinos en producción intensiva, disminuye el consumo de materia seca, mejora la ganancia diaria de peso y la conversión alimenticia. Además, aumenta el peso de la canal y el grado de rendimiento de la canal, así como una mejor tasa de retorno de la inversión a mayores dosis del CMCZ.

#### **IV. OBJETIVOS.**

##### **4.1. Objetivo general.**

Comparar el efecto de la adición de diferentes dosis de un complejo de Metionina-Cromo-Zinc (CMCZ) en la dieta sobre el comportamiento productivo, peso canal caliente y rendimiento de la canal, además de la relación costo-beneficio en bovinos de raza cárnica durante el periodo de finalización.

##### **4.2. Objetivos específicos.**

- Evaluar el efecto de la adición de diferentes niveles 3.6, 7.2 y 10.8 g de un CMCZ (3, 6 y 9 mg de Cr) en la dieta de bovinos durante el periodo de finalización sobre:
  - El comportamiento productivo: la ganancia diaria de peso, el consumo diario de alimento, y la conversión alimenticia.
  - Los pesos de la canal: El peso de canal caliente, y el rendimiento de canal caliente.
- Evaluar el costo-beneficio de adicionar un CMCZ a diferentes dosis en ganado bovino productor de carne durante la etapa de finalización.

## **V. MATERIAL Y MÉTODOS.**

### **5.1. Bioética.**

El estudio fue aprobado por el comité de Bioética de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro con el No. De registro 0029FCN2024.

### **5.2. Lugar de estudio.**

El estudio se realizó en las instalaciones de un corral comercial localizado en el Estado de Veracruz en el municipio de Tierra Blanca, a una altitud de entre 10 y 350 msnm, entre los paralelos 18°, 19' y 18°, 45' (INEGI, 2010).

### **5.3. Manejo de los animales.**

Previo al inicio del estudio, se seleccionaron un total de 1500 toretes con un peso promedio de 473.83 kg  $\pm$  48.31, divididos en 15 corrales de 30 m x 40 m, con capacidad de 100 animales cada uno con orígenes, composición racial y días en alimentación similares. Los animales fueron pesados individualmente y se asignaron aleatoriamente a cualquiera de los corrales destino. Los pesos corporales se registraron en la hoja de campo correspondiente.

La prueba se inició durante el periodo de finalización cuando los animales comenzaron a consumir la dieta base finalizadora suplementada con Clorhidrato de Zilpaterol, a la cual se adicionaron diferentes dosis de CMCZ (3.6, 7.2 y 10.8 g/animal/día), los cuales proporcionaron 3, 6, 9 mg Cr/animal/día (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos experimentales:

Control = 3.6 g Met-Cr-Zn (3mg Cr)/animal/día
Media = 7.2 g Met-Cr-Zn (6mg Cr)/animal/día
Alta = 10.8 g Met-Cr-Zn (9 mg Cr)/animal/día

El perfil nutricional de la dieta fue: 50.1% MS; 1.86 ENm, Mcal/kg, 1.23 ENg Mcal/kg, 14.2 % de P.C., 0.54% de Ca, y 0.32 % de P.

#### 5.4. Diseño experimental.

El diseño experimental propuesto para este estudio fue de bloques incompletos completamente al azar con 5 repeticiones y 3 tratamientos, con un total de 15 corrales de prueba de 100 animales por corral. Durante la prueba murieron 11 animales por causas ajenas al estudio, además se retiraron animales (vagos o con datos irreales), los datos de estos animales fueron omitidos del análisis. Se retiró de la prueba el corral del tratamiento intermedio del bloque 3, debido a que al momento del análisis de información se observaron outlayers. En el Cuadro 3, se presenta el calendario de actividades del estudio:

Cuadro 3. Calendario de actividades en el estudio.

Fecha	Actividad
Día 0	Pesaje individual del ganado e inicio de suplementación de los tratamientos experimentales.
Día 35	Fin del periodo experimental, peso final del ganado.
Día 36	Embarque a planta TIF, matanza, Peso canal caliente (PCC).

#### 5.5. Manejo de los animales y aplicación del tratamiento.

Los animales consumieron la dieta de finalización suplementada con Clorhidrato de Zilpaterol durante 30 días, posteriormente se les ofreció durante 5 días la dieta de finalización sin suplementar el aditivo Clorhidrato de Zilpaterol (días de retiro).

La dieta de finalización fue la que se utiliza cotidianamente en la unidad de producción pecuaria y se elaboró siguiendo los procedimientos internos. Para suplementar el CMCZ en la dieta, se utilizó un producto comercial con la cantidad de cromo a evaluar mezclado con maíz molido cuanto baste para completar 20 kg, la cual se agregó en el comedero después del servido de alimento de la mañana y se mezcló manualmente. Se tomaron muestras aleatorias de cada uno de los tratamientos (maíz suplementado con el CMCZ), así como de la premezcla utilizada por la unidad de producción, las cuales fueron enviadas a laboratorios externos para

su análisis. El grupo testigo fue suplementado únicamente con 20 kg de maíz molido como placebo.

La asignación de alimento por corral se realizó 2 veces al día (6:00 am y 10:30 am) de acuerdo con la lectura diaria del comedero, durante los 35 días del estudio. Semanalmente se tomaron muestras del alimento para determinar el porcentaje de materia seca en freidora de aire, con los resultados de la materia seca se verificó la dosis de cromo consumida.

La ganancia de peso total fue calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{Ganancia de peso total} = \text{Peso final} - \text{Peso Inicial}.$$

La Ganancia diaria de peso fue calculada de la siguiente forma:

$$\text{Ganancia diaria de peso} = \frac{\text{Ganancia de peso total}}{\text{Días}}$$

El consumo de alimento diario promedio por corral fue calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo diario promedio} = \frac{\text{Consumo acumulado}}{\text{Días animal acumulado}}$$

Para determinar la conversión alimenticia, se dividió el consumo de alimento diario promedio ajustado por corral entre la ganancia diaria de peso durante la prueba.

$$\text{Conversión alimenticia} = \frac{\text{Consumo diario promedio}}{\text{Ganancia diaria de peso}}$$

## **5.6. Matanza y evaluación de Canales.**

Al finalizar la etapa de alimentación (día 34), todos los animales se pesaron individualmente y al día siguiente fueron enviados a la Planta TIF donde

permanecieron durante un mínimo de 3 horas en corrales de descanso con agua a libre acceso, una vez cumplidas las 3 horas de descanso se realizó el proceso de matanza en la planta TIF 101 siguiendo las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG-ZOO-2014 (Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres). Cada canal se identificó y se pesó individualmente para determinar el porcentaje de rendimiento en caliente con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento canal caliente} = \frac{\text{Peso Canal Caliente}}{\text{Peso Final}} \times 100$$

### **5.7. Tasa de retorno de la inversión.**

Se comparó la dosis alta respecto a la dosis control y se determinó el beneficio neto utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Beneficio neto} = \text{Ingresos adicionales} - \text{Costo de inversión}$$

Finalmente se determinó la tasa de retorno de la inversión utilizando la fórmula:

$$\text{Tasa de retorno de la inversión} = \frac{\text{Beneficio neto}}{\text{Costo de inversión}} \times 100$$

### **5.8. Manejo de datos y análisis estadístico.**

Se utilizó un modelo de bloques incompletos. Todos los datos registrados en el estudio fueron sometidos a un análisis utilizando modelos lineales generalizados (GLM) y la diferencia entre medias fue analizada mediante una prueba de LSMEANS (SAS inst., Inc., Cary., NC). Para las variables peso final, ganancia de peso total, ganancia diaria de peso, peso canal caliente y porcentaje de rendimiento canal caliente la unidad experimental fue cada animal de la prueba. Para las variables consumo diario promedio, consumo diario promedio en base seca, conversión alimenticia en base húmeda y conversión alimenticia en base seca, la

unidad experimental fue el corral. Para la variable Consumo de alimento en base seca, se utilizó el peso inicial como covariable, en las demás variables, no se observó efecto del peso inicial como covariable en el modelo.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

De las muestras de premezcla enviadas a laboratorio externo, se observó una concentración de 366 mg/kg Cr BH, lo que significa 395 mg/kg Cr BS. Los niveles de cromo obtenidos para los tratamientos experimentales fueron 3.34 ppm de Cr para el grupo control, 11.08 ppm de Cr para el grupo de la dosis intermedia y 14.50 ppm de Cr para el grupo de la dosis alta. Estos valores se encuentran por encima de los valores suplementados calculados, lo cual puede deberse a contaminación principalmente del suelo como de metales durante los procesos (Spears *et al.*, 2017). En el Cuadro 4 se resumen las medias mínimas cuadráticas del comportamiento productivo de ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un CMCZ.

Cuadro 4. Comportamiento productivo de ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un CMCZ.

	Tratamientos <sup>1</sup>				
Variable	Control	Media	Alta	SEM	P
<b>N</b>	493	394	489		
<b>Peso Inicial (kg)</b>	474.99	474.24	473.73	0.21	0.09
<b>Peso Final (kg)</b>	524.17	521.38	524.17	0.95	0.48
<b>GPT (kg)</b>	49.18	47.14	50.44	1.00	0.48
<b>GDP (kg)</b>	1.45	1.39	1.49	0.03	0.48
<b>CDPBS (kg)</b>	8.05 <sup>b</sup>	8.27 <sup>a</sup>	7.79 <sup>c</sup>	0.03	0.004
<b>CABS (kg)</b>	5.37 <sup>y</sup>	5.87 <sup>x</sup>	5.16 <sup>y</sup>	0.10	0.07

<sup>1</sup> Medias mínimas cuadráticas.

GPT= Ganancia de Peso Total, GDP= Ganancia Diaria de Peso, CDPBS= Consumo Diario Promedio Base seca, CABS= Conversión Alimenticia Base Seca.

En el Cuadro 5 se resumen las medias mínimas cuadráticas del peso y rendimiento de canal caliente en ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un CMCZ.

Cuadro 5. Peso y rendimiento de canal caliente en ganado bovino suplementado con diferentes niveles de un CMCZ.

Variable	Tratamientos <sup>1</sup>			SEM	P
	Control	Media	Alta		
<b>N</b>	493	394	489		
<b>Peso Final (kg)</b>	524.17	521.38	524.17	0.95	0.48
<b>PCC (kg)</b>	327.19	325.38	325.58	0.44	0.25
<b>%RCC (%)</b>	62.55	62.58	62.28	0.17	0.73

<sup>1</sup> Medias mínimas cuadráticas.

PCC= Peso Canal Caliente, %RCC= % Rendimiento Canal Caliente.

No se observó un efecto del tratamiento ( $P > 0.05$ ) sobre el peso final, la ganancia de peso total, la ganancia diaria de peso, el peso de canal caliente o el porcentaje de rendimiento al administrar diferentes dosis de un CMCZ. En contraste, hubo una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) para la variable consumo de materia seca, entre tratamientos; el grupo control consumió menos materia seca respecto al el grupo de la dosis intermedia (8.05 kg vs 8.27 respectivamente), mientras que el grupo de la dosis alta consumió menos alimento que el grupo de la dosis intermedia (7.79 kg vs 8.26 kg respectivamente), el grupo de la dosis alta consumió menos materia seca que el grupo control (7.79 vs 8.05 respectivamente). Esto se traduce en un ahorro de 0.26 kg de materia seca por animal al día, es decir 9.1 kg de materia seca durante todo el periodo experimental, sin tener un efecto negativo sobre la ganancia de peso, ni sobre el peso de la canal. Se observó una tendencia sobre la conversión alimenticia en base seca, dónde el grupo suplementado con la dosis alta y el grupo control fueron similares entre sí, pero diferentes al grupo suplementado

con la dosis media, el cual fue menos eficiente (5.16 y 5.37 vs 5.87 kg respectivamente,  $P=0.0745$ ).

Los resultados obtenidos en el presente estudio difieren por lo reportado por Jin y Zhou (2022) quienes al alimentar corderos con diferentes niveles de cromo (0, 0.75 y 1.50 mg Cr/día) en forma de metionina de cromo observaron una tendencia sobre el peso final ( $P=0.08$ ) y la ganancia diaria de peso ( $P=0.09$ ) por efecto del tratamiento. Sin embargo, al igual que en el presente estudio, no observaron efecto sobre el peso de la canal caliente ni sobre el porcentaje de rendimiento en canal; además reportaron una tendencia ( $P=0.09$ ) sobre la conversión alimenticia, donde el grupo control fue el que tuvo la conversión alimenticia más alta (menos eficiente) y el grupo tratado con la dosis alta el que tuvo la conversión alimenticia más baja (más eficiente). En el presente estudio tanto el grupo control como el grupo tratado con la dosis alta fueron similares entre si sobre la conversión alimenticia, siendo el grupo con la dosis intermedia el que tuvo la mayor conversión alimenticia. Estas diferencias pueden deberse además de la diferencia en los modelos biológicos donde se evaluó la suplementación de cromo, como a las diferencias en el grupo control ya que en el presente estudio recibía una suplementación basal del complejo MCZ y en el estudio realizado por Jin y Zhou (2022) el grupo control no recibía suplementación con cromo. Monterrosa (2008) tampoco observó un efecto sobre el peso final al suplementar diferentes niveles de metionina de cromo en bovinos durante el periodo de finalización (suplementado con Clorhidrato de Zilpaterol). A diferencia de lo obtenido en el presente estudio, el autor observó un efecto al suplementar una dosis alta (400 ppm) de metionina de cromo sobre la ganancia de peso total y la ganancia diaria de peso respecto al grupo suplementado con 0.200 y 0 ppm de metionina de cromo; además no observó efecto sobre el consumo de materia seca en animales suplementados con diferentes niveles de metionina de cromo. El autor reporta una mejoría del 4.1% en la conversión alimenticia. Las diferencias detectadas pueden deberse a que en el estudio realizado por Monterrosa, el grupo control no recibió suplementación, además, del tamaño de la muestra, ya que en el estudio de Monterrosa, se utilizó un total de 45 animales, y

tuvo 3 repeticiones por corral, a diferencia del presente estudio dónde la población fue de 1500 animales y 5 repeticiones, por su parte los resultados de peso de canal caliente y de rendimiento canal caliente coinciden con lo reportado por Monterrosa (2008) quien tampoco encontró un efecto sobre dichas variables al suplementar diferentes niveles de metionina de cromo. Trojan *et al.* (2023) tampoco encontraron efecto sobre el peso final, ganancia diaria de peso, peso canal caliente ni rendimiento en canal al suplementar novillos con 0.5 mg de Cr/kg de MS en forma de propionato de cromo respecto al grupo control que no recibió suplementación, sin embargo a diferencia de lo reportado en el presente estudio, no observaron diferencias sobre el consumo de materia seca al suplementar 0.5 mg de Cr/Kg MS en forma de propionato de Cr respecto al grupo control, y tampoco observaron diferencias sobre la eficiencia alimenticia. En contraste, a lo reportado en el presente estudio, Pollard *et al.* (2002), observaron un menor peso final en animales suplementados con 0.4 ppm de cromo en forma de levadura durante 196 días de prueba, respecto al grupo suplementado con 0.2 ppm de cromo en forma de levadura y el grupo control (461.2 kg vs 512.1 kg y 506.7 kg respectivamente  $P < 0.05$ ). Además los autores reportaron una mayor ganancia diaria de peso en los grupos control y suplementado con 0.2 ppm, de cromo respecto al grupo suplementado con 0.4 ppm (1.10 y 1.15 vs 0.93 kg,  $P < 0.05$ ), no observaron un efecto sobre el consumo de materia seca, pero si observaron un efecto sobre la eficiencia alimenticia, donde el grupo suplementado con 0.2 ppm de cromo fue similar al control (129.0 g/kg y 135.1 g/kg  $P > 0.05$ ) y al grupo suplementado con 0.4 ppm de cromo (118.6), siendo el grupo control y el suplementado con 0.4 ppm de cromo en forma de levadura enriquecida con cromo diferentes entre sí ( $P < 0.05$ ), observaron diferencias entre los 3 tratamientos ( $P < 0.05$ ) sobre el peso de la canal caliente, siendo el grupo suplementado con 0.2 ppm el que presentó la canal más pesada (315.4kg), seguido del grupo control (302.2 kg) y finalmente el grupo de la dosis alta (275.8 kg), por su parte el grupo control y suplementado con 0.2 ppm de cromo en forma de levadura presentaron mayores rendimientos en canal respecto al grupo suplementado con 0.4 ppm (63.4, 63.7 vs 62.2,  $P < 0.05$ ), estos resultados difieren con lo presentado en

el presente estudio donde no hubo diferencia en el peso final, ambos estudios presentan diferencias por ejemplo los días de duración, Pollard *et al.* (2002) hicieron el estudio en 196 días, mientras que en el presente estudio fueron 35 días, otra diferencia es la fuente de cromo evaluada, es decir levadura enriquecida respecto a complejo MCZ. Budde *et al.* (2019) encontraron un aumento en el peso final de novillos al suplementar cromo en la dieta, además de una mayor ganancia diaria de peso respecto al grupo que no recibió suplementación con cromo, adicionalmente, observaron un aumento en el peso de la canal caliente al suplementar cromo respecto al grupo no suplementado. Budde *et al.* (2019) no observaron diferencias significativas sobre el consumo de materia seca, aunque los autores reportan una tendencia ( $P < 0.13$ ) donde la suplementación con cromo aumenta el consumo de materia seca respecto al grupo no suplementado, los autores no observaron efecto al suplementar cromo respecto al grupo que no recibió suplementación sobre la conversión alimenticia, estas diferencias pueden deberse a que los autores evaluaron una dosis de cromo de 0.25 mg de Cr/Kg MS la cual fue inferior incluso que la evaluada en el grupo control del presente estudio. Respecto al porcentaje de rendimiento los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden con lo reportado por Budde *et al.* (2019) quienes tampoco observaron efecto sobre el porcentaje de rendimiento en canal al suplementar cromo respecto al grupo no suplementado. Por su parte, Budde *et al.* (2019) no observaron efecto sobre el comportamiento productivo al aumentar la suplementación de zinc de 30 a 90 mg/Kg MS en forma de hidrocloreuro de zinc, observando solamente una tendencia a tener menores pesos de canal caliente con la dosis baja, en el presente estudio todos los grupos evaluados contenían niveles de zinc en forma inorgánica que por sí sola cubría los requerimientos nutricionales de dicho mineral, por lo cual es probable que no se haya podido observar diferencias por efecto del zinc. En el presente estudio, tanto el grupo control como el resto de los grupos evaluados contenían niveles de zinc superiores a 87.3 mg/Kg MS que es el promedio de suplementación de zinc que están reportando diferentes consultores a través de una encuesta realizada por Samuelson *et al.* (2016). Un estudio realizado por Baggerman (2017) no presentó

diferencias sobre la ganancia diaria de peso al suplementar diferentes dosis de propionato de cromo en novillos durante la fase de suplementación con ractopamina. Sin embargo, Baggerman (2017) observó un efecto lineal ( $P < 0.01$ ) sobre el peso final y el peso de la canal caliente al suplementar diferentes niveles de propionato de cromo, lo cual corresponde a una tendencia observada durante los primeros 119 días, donde también hubo un efecto lineal sobre el peso vivo al suplementar diferentes dosis de propionato de cromo. La autora no observó efecto al suplementar diferentes niveles de propionato de cromo sobre el consumo de materia seca ni sobre la eficiencia alimenticia. En el presente estudio la suplementación sólo se llevó a cabo durante el periodo de finalización con  $\beta$ -agonista y no durante todo el periodo de engorda. Los resultados obtenidos en el presente estudio difieren con lo reportado por Smock *et al.* (2020) quienes observaron un efecto negativo al suministrar propionato de cromo a una dosis de 0.450 ppm sólo o combinado con 13 g/cabeza día de *Bacillus subtilis* sobre el peso final (625.5 kg vs 640 kg,  $P=0.02$ ) y la ganancia diaria de peso durante el periodo de finalización suplementado con clorhidrato de ractopamina (1.235 vs 1.34 kg  $P=0.07$ ) respecto a los grupos que no recibieron suplementación con propionato de cromo, sin embargo, igual que en el presente estudio, los autores además observaron una disminución en el consumo de materia seca al suplementar propionato de cromo a una dosis de 450 ppb sólo o combinado con 13 gramos por animal al día de *Bacillus subtilis* respecto a los grupos que no recibieron suplementación de propionato de cromo (8.86 kg vs 9.23 kg respectivamente,  $P=0.02$ ), los autores no reportan efecto sobre la eficiencia alimenticia al suplementar propionato de cromo respecto a los grupos no suplementados. En el caso del estudio de Smock *et al.* (2020), observaron una disminución en el peso de la canal caliente en los grupos suplementados con cromo ( $P=0.01$ ), la suplementación con propionato de cromo no tuvo efecto sobre el rendimiento en canal respecto a los grupos no suplementados.

El efecto de la suplementación de zinc en la literatura es muy variado, Chanda *et al.* (2020) no han encontrado efecto sobre el crecimiento, peso canal caliente o

rendimiento canal caliente al suplementar 30 o 90 mg Zn/Kg MS en forma de metionina de zinc o la dosis alta adicionada con 10 mg Cu/Kg MS. Los resultados sobre el consumo de materia seca obtenidos en el presente estudio difieren de lo reportado por Chanda *et al.* (2020) quienes no encontraron efecto al evaluar 30 y 90mg Zn/Kg MS en forma de metionina de zinc y un tercer grupo adicionado con 10 mg Cu/Kg MS a través de una fuente de cobre conjugado con aminoácidos, esta diferencia en los resultados puede ser debido al producto utilizado, ya que Chanda *et al.* (2020) no utilizaron cromo en su estudio. Tanto en el estudio realizado por Chanda *et al.* (2020) y el presente estudio, la dieta basal contenía una fuente inorgánica de zinc, además de la fuente orgánica suplementada, es posible que por sí sola la dieta basal cubriera los requerimientos de zinc del animal y por lo tanto no se observara un efecto al suministrar diferentes dosis del producto de prueba. Carmichael *et al.* (2020) no observaron efecto sobre el peso final, peso canal caliente ni rendimiento en canal al suplementar diferentes fuentes de zinc respecto al grupo control que no recibió suplementación con zinc durante los últimos 36 días de la engorda. Sin embargo, si observaron efecto al suplementar diferentes fuentes de zinc sobre la ganancia diaria de peso entre el día 60 y 90 de la engorda. Schulte *et al.* (2023) observaron que la suplementación con niveles mayores de zinc respecto a lo establecido por el NRC (120 mg/kg MS, 60 mg en forma de ZnSO<sub>4</sub> y 60 mg en forma de un complejo con aminoácidos vs 36 mg/kg MS) en novillos resultaba en mayores pesos de canal caliente (448.5 kg vs 434.5 kg respectivamente P=0.05) y mayor porcentaje de rendimiento (60.1% vs 59.2 respectivamente P=0.03), estos resultados difieren con lo obtenido en el presente estudio debido a que la dieta basal utilizada en este estudio posiblemente cubría los requerimientos de zinc del ganado ya que contenía una fuente inorgánica de zinc superaba los requerimientos establecidos por el NRC. Messersmith *et al.* (2022) a diferencia de lo reportado en el presente estudio, no observaron diferencia significativa sobre el peso final, pero si observaron un efecto cúbico al suplementar diferentes niveles de zinc (0, 100, 150 y 180 mg Zn/kg MS) en forma de óxido de zinc durante la suplementación con clorhidrato de ractopamina sobre la ganancia

diaria de peso, siendo la dosis de 150 mg Zn/kg MS el grupo que tuvo menor ganancia diaria de peso, esta diferencia observada respecto al presente estudio, puede ser debido a la fuente de zinc utilizada en ambos estudios, además de las dosis de zinc suplementario. Messersmith *et al.* (2022) observaron una tendencia al suplementar zinc en forma de óxido a diferentes dosis respecto a no suplementar zinc en la dieta de novillos cruzados de Angus durante la fase de finalización con clorhidrato de ractopamina sobre el peso de canal ( $P=0.07$ ). Sin embargo, no observaron efecto entre las diferentes dosis de zinc. Los autores a diferencia de lo observado en el presente estudio no observaron efectos sobre el consumo de materia seca, sin embargo, observaron un efecto cúbico sobre la eficiencia alimenticia ya que al suplementar 150 y 180 mg Zn/kg de MS la eficiencia alimenticia disminuía respecto al grupo control (sin suplementación) y al grupo suplementado con 100 mg Zn/kg MS. Se ha sugerido una dosis de 100 mg de suplementación de zinc/kg MS como la dosis óptima para mejorar el rendimiento, no observando beneficios adicionales al suplementar más de 100 mg de zinc suplementario/Kg de MS (Messersmith *et al.*, 2022). Wellmann *et al.* (2020) observaron una mayor ganancia diaria de peso al suplementar propionato de zinc durante la etapa de finalización con ractopamina en novillos cruzados respecto al grupo que no recibió suplementación con zinc (0.9 vs 0.7 kg  $P=0.02$ ), sin embargo, no observaron un efecto sobre el consumo de materia seca al suplementar propionato de zinc en novillos cruzados durante la etapa con ractopamina, en cambio, si observaron diferencia sobre la eficiencia alimenticia, siendo el grupo suplementado con propionato de cromo el que convirtió más kg de peso por kg de materia seca consumida respecto al grupo control (0.107 kg vs 0.087 kg  $P=0.03$ ). Esta diferencia puede ser explicado ya que, en el presente estudio, el grupo control recibió suplementación con zinc en forma inorgánica como orgánica a través del CMCZ, lo cual sugiere que los requerimientos de zinc fueron cubiertos. Al igual que lo reportado en el presente estudio, Wellman *et al.* (2020) no encontraron diferencias al suplementar propionato de zinc sobre el peso de la canal caliente ni sobre el grado de rendimiento respecto al grupo control durante la etapa de finalización con

ractopamina. Wright y Spears (2004) suplementaron terneros Holstein con 20 mg de Zn/Kg MS en forma de  $\text{ZnSO}_4$ , en forma de Zn proteinato o en una combinación 50%-50% de  $\text{ZnSO}_4$  y Zn proteinato durante 98 días y no observaron efecto sobre la ganancia diaria de peso, el consumo de materia seca, ni sobre la eficiencia alimenticia. Posteriormente, del día 99 al 112, la mitad de los animales de cada grupo suplementado con zinc, fueron suplementados con 500 mg de Zn/kg de MS de la misma fuente que habían sido suplementados, y tampoco se observó efecto sobre la ganancia diaria de peso, consumo de materia seca, ni eficiencia alimenticia, sin embargo, se observó una tendencia por parte de los grupos de dosis alta de suplementación ( $P < 0.10$ ) a ganar peso más rápido que los grupos suplementados con dosis bajas de zinc, estos efectos sobre la ganancia de peso no se observaron en el presente estudio, debido a que posiblemente desde el grupo control se logró cubrir los requerimientos de zinc del ganado. Arelovich *et al.* (2008) no encontraron efecto sobre la ganancia diaria de peso ni sobre el consumo de materia seca al suplementar una dosis de 430 mg/kg MS de zinc en forma de anhídrido  $\text{ZnCl}_2$  respecto al grupo control que no recibió suplementación, la dosis fue superior a la evaluada en el presente estudio donde los tres grupos recibieron suplementación de zinc en forma de óxido de zinc. Al igual que en el presente estudio, no observaron efecto de la suplementación con zinc sobre la eficiencia alimenticia respecto al grupo control a pesar de que utilizaron dosis mayores de zinc que las evaluadas en el presente estudio y las compararon con grupos que no recibieron suplementación con zinc. Krebs (2000) menciona que el tracto gastrointestinal tiene diferentes mecanismos para mantener la homeostasis de zinc en el organismo a través de procesos de absorción de zinc exógeno y de secreción y excreción de zinc endógenos. El NRC (2000) establece una dosis de 500 mg/kg MS como la concentración máxima tolerable. Existe una enorme discrepancia sobre la utilización del zinc por lo cual se ha postulado seguir investigando para poder determinar la óptima suplementación del zinc (Schulte *et al.*, 2023).

En el presente estudio, el producto evaluado utiliza la metionina por su efecto quelante para aumentar la biodisponibilidad de los minerales traza. En la literatura

algunos autores han evaluado el efecto de la metionina en la nutrición de rumiantes. Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden con lo reportado por Baggerman *et al.* (2021) quienes tampoco encontraron diferencias sobre el peso final, ganancia de peso, eficiencia alimenticia, peso canal caliente, rendimiento canal caliente en novillos cruzados suplementados con diferentes niveles de metionina protegida, explicando la falta de respuesta a la suplementación con una metionina protegida fue debido a que las dietas no eran deficientes en metionina. De igual forma, Torrentera *et al.* (2017) no observaron efecto sobre la ganancia diaria de peso al administrar diferentes dosis de metionina y una dosis de 1.01%/Kg MS de lisina sobre la ganancia diaria de peso. A diferencia de lo observado en el presente estudio, Torrentera *et al.* (2017) observaron un aumento (efecto cuadrático) sobre la eficiencia alimenticia al suplementar durante 56 días diferentes dosis de metionina y una dosis de 1.01% Kg MS de lisina, efectos que se mantuvieron constantes hasta el día 112, a pesar de que desde el día 56 no recibieron suplementación mineral. Los autores mencionan que, en fases iniciales de crecimiento en corral de engorde, la metionina es el principal aminoácido limitante sobre todo en dietas a base de maíz roado utilizando urea como única fuente de proteína, en el presente estudio se utilizó ganado en la etapa de finalización, donde los microorganismos ruminales tienen capacidad de satisfacer los requerimientos de aminoácidos, incluyendo aminoácidos limitantes. Además Park *et al.* (2020) no encontraron efecto al suplementar una metionina protegida en rumen y tocoferol sobre el peso final y peso de la canal caliente de novillos de raza Honwoo, pero si encontraron una tendencia a mejorar la ganancia diaria de peso (0.67 kg vs 0.50 kg  $P=0.08$ ) y la ganancia de peso total (83.29 kg vs 62.43 kg  $P=0.08$ ) respecto al grupo control, estas diferencias con lo obtenido en el presente estudio puede deberse a que Park *et al.* (2020) utilizaron grasa protegida de rumen (aceite de palma y calcio) como vehículo para ofrecer la metionina y el  $\alpha$  Tocoferol en novillos Honwoo, aportando a cada animal 3 gramos de metionina, 0.1 gramos de  $\alpha$  Tocoferol y 16.9 gramos de grasa protegida de rumen, el grupo control no recibió grasa protegida como placebo. Por su parte, Park *et al.* (2020) no observaron

efecto sobre el consumo de alimento; sin embargo, si observaron un efecto sobre la eficiencia alimenticia, siendo menor para el grupo tratado respecto al grupo control que no recibió suplementación (15.09 vs 22.55 kg,  $P=0.04$ ), el estudio realizado por Park utilizaron 14 novillos de raza Honwoo, considerando los autores un número pequeño de muestra, con lo cual sugieren para ver un efecto se debe realizar el estudio con mayor cantidad de animales y dosis mayores de suplementación.

Por su parte Vellini *et al.* (2020) no observaron diferencias sobre el peso final, la ganancia diaria de peso o el peso de la canal caliente al suplementar un complejo de Zn con aminoácidos (ZnAA), el complejo de ZnAA y metionina de cromo (ZnCr) respecto al grupo no suplementado, estos datos coinciden con lo observado en el presente estudio. A diferencia de lo obtenido en el presente estudio, Vellini *et al.* (2020) no observaron efecto sobre el consumo de materia seca y si observaron un efecto sobre la eficiencia alimenticia siendo el grupo ZnCr el que presentó una mayor eficiencia respecto al grupo ZnAA y control, los cuales fueron similares entre sí (0.168 vs 0.159 y 0.161 respectivamente,  $P=0.011$ ) y sobre el porcentaje de rendimiento en canal, siendo el grupo control el que presentó el mayor porcentaje de rendimiento (56.6%<sup>a</sup>), seguido del grupo ZnAA (56.4%<sup>ab</sup>), siendo el grupo ZnCr el que presentó el menor porcentaje de rendimiento (55.9%<sup>b</sup>) ( $P=0.024$ ). Estos resultados diferentes se deben posiblemente a las dosis evaluadas, ya que en el estudio de Vellini *et al.* (2020), el grupo control no recibió suplementación y el grupo suplementado con cromo recibió una suplementación de 0.3 mg/kg Cr, lo cual correspondería a la dosis consumida por el grupo control en el presente estudio.

La falta de respuesta a la suplementación de cromo en el presente estudio puede deberse al estado inicial de cromo en los animales (Lashkari *et al.*, 2018). A pesar de que se sugiere que las dietas convencionales llegan a cubrir por si solas los requerimientos de cromo en los animales, la suplementación con cromo ayuda a prevenir las pérdidas de cromo bajo condiciones de estrés (Lashkari *et al.*, 2018). Borgs y Mallard (1998), sugieren que la suplementación con cromo puede tener una mejor respuesta en animales sometidos a estrés. Además, se ha reportado que cuando se utiliza acetato, el efecto es mucho menos pronunciado que cuando se

utiliza glucosa (Mertz *et al.*, 1960). En el presente estudio la dieta contenía niveles altos de cáscara de naranja y afrecho de cervecería además de maíz molido (52.57% en MS). Trojan *et al.* (2023) sugieren una falta de respuesta significativa al suplementar propionato de cromo en bovinos, debido al estado de bajo estrés durante la prueba, lo cual es similar a la respuesta obtenida del ganado en este estudio, el cual era ganado ya adaptado. Se ha observado un aumento en el consumo de materia seca en vacas lecheras al suplementar diferentes niveles de metionina de zinc, aumentan los niveles sanguíneos de IL-2, que a su vez influyen en los niveles de leptina, hormona relacionada con el consumo de alimento (Chen *et al.*, 2020). Sin embargo, en el presente estudio es posible que la dieta del grupo control cubriera los requerimientos de zinc. La disminución en el consumo de materia seca puede ser debido a la acción del cromo, debido a su acción sobre la señalización de la insulina (Vincent, 2000), en vaquillas en crecimiento se ha demostrado que la suplementación con cromo aumenta la sensibilidad a nivel tisular a la insulina (Spears *et al.*, 2012). Además, Vellini *et al.* (2020) reportan estudios en los cuales la suplementación con cromo orgánico tiende a aumentar la conversión de propionato a glucosa. El consumo de alimento es regulado por la homeostasis energética, la cual se coordina a nivel del hipotálamo (Amitani *et al.*, 2013). Liefers *et al.* (2002), mencionan que la leptina es una proteína con un peso de 16 kDa y es sintetizada por el tejido adiposo (Liefers *et al.*, 2002; Amitani *et al.*, 2013; Macedo *et al.*, 2017), secretada al torrente sanguíneo y a través de la barrera hematoencefálica y del líquido cefalorraquídeo llega al cerebro (Amitani *et al.*, 2013) y actúa principalmente a nivel del hipotálamo (Amitani *et al.*, 2013; Macedo *et al.*, 2017), dónde interviene en la regulación del consumo de alimento (Liefers *et al.*, 2002; Amitani *et al.*, 2013), reproducción (Liefers *et al.*, 2002; Macedo *et al.*, 2017), balance energético, respuesta inmune (Liefers *et al.*, 2002) y características de la canal (Macedo *et al.*, 2017). La leptina se une al receptor localizado principalmente en las neuronas del neuropéptido Y, dando como resultado una disminución del consumo de alimento y un aumento en el gasto energético (Liefers *et al.*, 2002). Urso *et al.* (2024) observaron que al adicionar células satélite de bovinos con niveles

altos de metionina (10 mg/ml) y niveles bajos de cromo en forma de cromo-acetato (1  $\mu$ M) o al adicionar niveles bajos de metionina (1mg/ml) y niveles altos de cromo en forma de cromo-acetato (10  $\mu$ g) se redujo la expresión de miogenina ( $P < 0.01$ ), la cual inicia la diferenciación terminal en las células satélite, por lo que los autores sugieren que tanto la metionina como el cromo actúan de forma conjunta sobre la diferenciación de las células satélite y que tanto el cromo como la metionina afectan la absorción de nutrientes y la expresión génica. Se cree que el metabolismo de la glucosa y la señalización de la insulina tienen efecto sobre el crecimiento y la eficiencia productiva, sin embargo, se recomienda estudiar más a fondo los mecanismos moleculares que intervienen en estos efectos (Foote *et al.*, 2024). Toros Nellore clasificados en bajo consumo de alimento residual (más eficientes) y alto consumo de alimento residual (menos eficientes) presentaron diferencias significativas en cuanto al consumo de materia seca y consumo de alimento residual siendo los animales del grupo de bajo consumo de alimento residual los que presentaron un menor consumo de materia seca y un menor consumo de alimento residual. Sin embargo, no se observó efecto sobre el peso inicial, ni sobre el peso final ni sobre el área del ojo de costilla, durante el estudio, adicionalmente, se observó una diferencia entre los grupos en la concentración de leptina, el grupo de bajo consumo de alimento residual presentó mayor expresión del gen leptina (Macedo *et al.*, 2017). Foote *et al.* (2024) en su revisión, resalta el papel del propionato en la señalización de saciedad en rumiantes, además de que actúa en la gluconeogénesis induciendo la liberación de insulina y posteriormente la resistencia a la insulina. Sin embargo, en el estudio que realizaron Foote *et al.* (2024) no observaron una correlación entre el consumo diario de materia seca y la prueba de tolerancia a la glucosa intravenosa (IVGTT), sin embargo, si observaron una correlación entre ganancia de peso y la IVGTT. Se ha demostrado que a medida que los novillos aumentan de peso e incrementan la deposición de grasa, algunos tejidos periféricos y el hígado presentan una menor respuesta a la insulina (Eisemann *et al.*, 1997). En resumen, el cromo al estimular la señalización de insulina aumenta la entrada de glucosa a la célula y por lo tanto hay mayor

lipogénesis con lo cual se libera leptina al sistema circulatorio, viajará al cerebro atravesando la barrera hematoencefálica llegando al hipotálamo teniendo un efecto inhibidor sobre el neuropéptido Y teniendo un efecto anoréxico.

### **Impacto económico:**

Con base a los resultados obtenidos, se puede observar un ahorro de 9.1 kg de materia seca durante los 35 días de finalización en los animales suplementados con la dosis alta del CMCZ respecto al grupo control sin afectar la ganancia de peso ni el peso de canal o el grado de rendimiento de la canal, este ahorro de 9.1 kg de materia seca equivale a un ahorro de \$40.95 pesos mexicanos por animal. El costo de suplementar la dosis alta del complejo respecto al grupo control durante los 35 días de finalización es de \$25.2 pesos mexicanos. Tomando en cuenta estos valores, el suplementar la dosis alta del Complejo Metionina-Cromo-Zinc bajo las condiciones del presente estudio representa un ahorro de \$15.75 pesos mexicanos, dando una tasa de retorno de la inversión de 62.5%.

## **VII. CONCLUSIONES.**

Bajo las condiciones del presente estudio, se puede concluir que la administración de una dosis alta del CMCZ, promovió un menor consumo de materia seca respecto al grupo que recibió la dieta basal sin afectar la ganancia de peso ni el peso en canal, lo cual se traduce en un ahorro de 9.1 kg de alimento en materia seca por animal durante el periodo de finalización.

La dosis media tuvo un efecto en detrimento sobre el consumo de materia seca, siendo el grupo que presentó un mayor consumo de materia seca y por consiguiente una mayor conversión alimenticia.

Las características de la canal evaluadas (peso canal caliente y porcentaje de rendimiento) no fueron afectadas por efecto del tratamiento.

***Implicaciones:***

A nivel económico, se observó una tasa de retorno de la inversión de 62.5% al suplementar una dosis alta del CMCZ respecto al grupo control debido a un ahorro en el consumo de materia seca.

Es importante evaluar las concentraciones de cromo en las diferentes materias primas utilizadas en la alimentación de los animales, así como conocer la forma en la que se encuentra y la digestibilidad que tiene en las diferentes especies animales.

Se recomienda seguir evaluando diferentes complejos minerales e interacciones con diferentes niveles de nutrientes en la dieta y diferentes condiciones ambientales.

Es importante hacer estudios para determinar el nivel de inclusión óptimo del cromo y el zinc, así como del complejo mineral evaluado en las diferentes etapas productivas del ganado bovino.

Para poder estudiar mejor el mecanismo de acción del CMCZ, se recomienda realizar pruebas de tolerancia a la glucosa y pruebas complementarias evaluando las concentraciones de insulina y glucosa a diferentes periodos.

Para corroborar el efecto de la leptina en la regulación del consumo de materia seca como resultado de una mayor entrada de glucosa en la célula, se recomienda evaluar la correlación entre las dosis de cromo y las concentraciones de leptina circulantes.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA.

1. Ahola, J. K., Sharpe, L. R., Dorton, K. L., Burns, P. D., Stanton, T. L., PAS, Engle, T. E. (2005). Effects of Lifetime Copper, Zinc and Manganese Supplementation and Source on Performance, Mineral Status, Immunity, and Carcass Characteristics of Feedlot Cattle. *The Professional Animal Scientist* 21: 305-317 (Pp. 305, 310, 311).
2. Alijani, K., Rezaei, J., Rouzbehan, Y. (2020). Effect of nano-ZnO, compared to ZnO and Zn-methionine, on performance, nutrient status, rumen fermentation, blood enzymes, ferric reducing antioxidant power and immunoglobulin G in sheep. *Animal Feed Science and Technology* No. 267. 11453
3. Amitani, M., Asakawa, A., Amitani, H., Inui, A. (2013). The role of leptin in the control of insulin-glucose axis. *Frontiers in Neuroscience*. Vol. 7. No. 51. 1-12. doi: 10.3389/fnins.2013.00051.
4. Anam, M. S., Astuti, A., Widyobroto, P. B., Agus, A. (2023). Effect of dietary supplementation with zinc-methionine on ruminal enzyme activities. Fermentation characteristics, methane production, and nutrient digestibility: An *in vitro* study. *Journal of advanced veterinary and animal research*. Vol. 10. No. 4. Pp: 696-703. ISSN 2311-7710
5. AOAC. Official Methods of Analysis. 15<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA. 1990.
6. Arelovich, M. H., Laborde, E. H., Amela, I. M., Torrea, B. M., Martínez, F. M. (2008). Effects of dietary addition of zinc and(or) monensin on performance, rumen fermentation and digesta kinetics in beef cattle. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 6(3), 362-372. ISSN: 1695-971-X.
7. Baggerman, O. J. (2017). Supplementation of chromium propionate alters growth performance and GLUT4 activity in feedlot steers. (Tesis Doctoral). Texas Tech University.
8. Baggerman, O. J., Smith, K. Z., Thompson, J. A., Kim, J., Hergenreder, E. J., Rounds, W., Johnson, J. B. (2020). Chromium propionate supplementation

alters animal growth performance, carcass characteristics, and skeletal muscle properties in feedlot steers. *Transl. Anim. Sci.* 4:1-14. doi: 10.1093/tas/txaa146.

9. Baggerman, O. J., Thompson, J.A., Jennings A. M., Hergenreder, E. J., Rounds, W., Smith, K. Z., Johnson, J. B. (2021). Effects of Encapsulated Methionine on Skeletal Muscle Growth and Development and Subsequent Feedlot Performance and Carcass Characteristics in Beef Steers. *Animals*, No 11. 1627. <https://doi.org/10.3390/ani11061627>.
10. Bohinski, R. C. (1998). Capítulo 3, Aminoácidos y Péptidos. En: *Bioquímica*. 5ª Edición (1991). Primera reimpresión en México (1998). Editorial Addison Wesley Longman de México S. A. de C. V. Impreso en México. Pp. 64-66, 68, 71.
11. Borgs P., Mallard A. B. A. (1998). Immune-endocrine interactions in agricultural species: chromium and its effect on health and performance. *Domest Anim Endocrinol*.15:431 - 8.
12. Boyer, R. (2000). *Conceptos de Bioquímica*. Editorial International Thomson Editores, S.A. de C.V. Impreso en México. Pp: 78, 79, 83, 84.
13. Broadway, P.R.; Carroll, J.; Burdick Sanchez, N.; Word, A.; Roberts, S.; Kaufman, E.; Richeson, J.; Brown, M.; Ridenour, K. (2021). Zinc Source and Concentration Altered Physiological Responses of Beef Heifers during a Combined Viral-Bacterial Respiratory Challenge. *Animals*, 11, 646. <https://doi.org/10.3390/ani11030646>.
14. Budde, M. A., Sellins, K., Lloyd, E. K., Wagner, J. J., Heldt, S. J., Spears, W. J., Engle, E. T. (2019). Effect of zinc source and concentration and chromium supplementation on performance and carcass characteristics in feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 97:1286–1295, doi:10.1093/jas/skz016.
15. Cantalapiedra, H. G., Ortigues, M. I., Sepchat, B., Titgemeyer, E., Bahloul, L. (2020). Methionine-balanced diets improve cattle performance in fattening young bulls fed high-forage diets through changes in nitrogen metabolism. *British Journal of Nutrition*, 124, 273–285. Doi:10.1017/S0007114520001154.

16. Carmichael, W. N. R., Genther, S. N. O., Hansen, L. S. (2020). The influence of dietary energy and zinc source and concentration on performance, trace mineral status, and gene expression of beef steers. *Transl. Anim. Sci.* 4:1-13  
Doi: 10.1093/tas/txaa207.
17. Castellanos, R. A., Shimada, M. A. (2018). Nutrientes inorgánicos. (4ª Ed.). En Shimada M. A. (Ed.). *Nutrición Animal* (pp. 309, 311-313, 316-327, 329-335). Editorial Trillas. Impreso en México.
18. Celis, G. A., Shimada, M. A. (2018). Aditivos e implantes. En Shimada M.A. (Ed.) *Alimentación Animal* (pp. 60, 62,73). Editorial Trillas. Impreso en México.
19. Chanda, L. E., Tibbetts, G., Branine, E. M. (2020). Influence of feeding amino acid complexes of zinc and copper on growth performance and carcass response of finishing steers fed ractopamine hydrochloride. *Translational animal science*, 4(Suppl 1), S122–S126. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa118>.
20. Chen, F., Li, Y., Shen, Y., Guo, Y, Zhao, X., Li, Q., Cao, Y., Zhang, X., Li, Y., Wang Z., Gao, Y., Li, J. (2020). Effects of peripartum zinc- methionine supplementation on feed digestibility, rumen fermentation patterns, immunity status, and passive transfer of immunity in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 103: 8976-8985.
21. Church, D. C., Pond, W. G., Pond, K. R. (2002), Elementos inorgánicos minerales. En *Fundamentos de nutrición y alimentación de animales* (2ª Ed.). Pp. 179-213, 217, 219-220. Editorial Limusa S.A. de C.V. Impreso en México.
22. Conn, E. E., Stumpf, K. P., Bruening, G., Doi, H. R. (1996), *Bioquímica fundamental*. 4ª Ed. Impreso en México. Editorial Limusa S.A. de C.V. Pp: 71, 84, 85, 561.
23. Consejo Mexicano de la Carne (2023), *Compendio Estadístico 2023*.
24. Davies, T. N. (1980). Studies on the absorption of zinc by rat intestine. *British Journal of Nutrition*, 43. 189-203. doi:10.1079/BJN19800078.
25. Depew, C. L., Bunting, D. L., Fernández, M. J., Thompson, L. D. J., Adkinson, W. R. (1998). Performance and Metabolic Responses of Young Dairy Calves

- Fed Diets Supplemented with Chromium Tripicolinate. *J. Dairy Sci.* 81: 2916-2923. Pp: 2916, 2918,
26. Dong, F., Reddy, K. M., Ren, J., Sreejayan, N. (2008). Chromium (D-phenylalanine)<sub>3</sub> Supplementation Alters Glucose Disposal, Insulin Signaling, and Glucose Transporter-4 Membrane Translocation in Insulin-Resistant Mice. *J. Nutr.* 138:1846-1851. Pp: 1846-1850.
  27. Duffy, R., Yin, M., Redding, E. L. (2023). A review of the impact of dietary zinc on livestock health. *Journal of Trace Elements and Minerals* 5 100085. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100085>
  28. Duplessis, M., Hassanat, F., Côrtes, C., Benchaar, C. (2025). Apparent zinc absorption in Ayrshire and Holstein lactating cows. *Animal- open space* 4. 100096. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2025.100096>.
  29. Eisemann, H. J., Huntington, B. G., Catherman, R. D. (1997). Insulin sensitivity and responsiveness of portal-drained viscera, liver, hindquarters, and whole body of beef steers weighing 275 or 490 kilograms. *J. Anim. Sci.* 75:2084–2091. <https://doi.org/10.2527/1997.7582084x>.
  30. Espino, G. M.A. (2011). Efecto del consumo de cromo adicional en el desempeño productivo, respuesta inmune y características de la canal de toretes en engorda intensiva. (Tesis de Maestría) Universidad Autónoma de Sinaloa.
  31. Farionik, V. T., Yaremchuk, S. O., Razanova, P. O., Ohorodnichuk, M. G., Holubenko, L. T., Glavatchuk, A. V. (2023). Effects of mineral supplementation on qualitative beef parameters. *Regul. Mech. Biosyst.* 14 (1): 64-69. doi: 10.15421/022310.
  32. Forbes, R. M., Erdman, J. J. W. (1983). Bioavailability of trace mineral elements. *Ann Rev Nutr* 3:213–231. <https://doi.org/10.1146/annurev.nu.03.070183.001241>.
  33. Foote, P. A., Salisbury, M. C., King, E. M., Rathert, W. A. R., McConnell, L. H., Beck, M. R. (2024). Association of glucose metabolism and insulin resistance with feed efficiency and production traits of finishing beef steers.

34. Ghassemi, N. J., Hun, L. B., Wan, K. B., Jip, O. S., Sung, I. K. (2016). Effects of chromium methionine supplementation on blood metabolites and fatty acid profile of beef during late fattening period in Holstein steers. *Asian Australian J. Anim. Sci.* Vol 29. No. 3: 378-383 (Pp: 378, 38-382). pISSN 1011-2367 eISSN 1976-5517
35. George, H. M., Nockels, F. C., Stanton, L. T., Johnson, B. (1997). Effect of Source and Amount of Zinc, Copper, Manganese, and Cobalt Fed to Stressed Heifers on Feedlot Performance and Immune Function. *The Professional Animal Scientist*. 13: 84-89 (pp. 86-88).
36. Glinsmann, H. W., Mertz, W. (1966). Effect of Trivalent Chromium on Glucose Tolerance. *Metabolism* 15: No. 6, June 510-520.
37. Global Animal Products. Sound Science, Start to Finish. Folleto Técnico.
38. Grant, S. M., Speer, F. H., Luchini, D. N., Blasi, A. D., Titgemeyer, C. E. (2022). Effect of supplemental methionine on health and performance of receiving beef heifers. *American Society of Animal Science. Translational Animal Science*. Vol. 6, Issue 4. <https://doi.org/10.1093/tas/txac113>
39. Horton, R. H., Moran, A. L., Scrimheour, G. K., Perry, D. M., Rawn, D. J. (2008). Capítulo 3. Los aminoácidos y la estructura primaria de las proteínas. En *Principios de Bioquímica*. 4ª Edición. Editorial Pearson Educación de México S.A. de C.V. Impreso en México. PP. 53, 54, 58 ,59 – 61.
40. Hung, T. A., Leury, J. B., Sabin, A. M., Fahri, F., DiGiacomo, K., Lien, T. F., Dunshea, R. F. (2023). Nano-chromium picolinate and heat stress enhance insulin sensitivity in cross-bred sheep. *Animal Nutrition* 13: 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.01.003>.
41. Hutjens, M. (2003). *Guía de alimentación* (2ª Ed.). Pp: 16, 18-19. Editorial Hoard's Daryman. Impreso en Estados Unidos.
42. INEGI (2010), *Compendio de información geográfica municipal 2010 Tierra Blanca, Veracruz de Ignacio de la Llave*. Consultado el 29 de enero de 2024.

Disponible en:  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30174.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30174.pdf)

43. INEGI, Economía y Sectores Productivos, consultado el 30 de agosto 2023, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ganaderia/>
44. INEGI (2022<sup>a</sup>). Existencias de bovinos según sistema de producción del ganado por entidad federativa y municipio. Datos del 15 de septiembre de 2022. Consultado el 5 de diciembre 2022. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/#datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/#datos_abiertos)
45. Jiménez, O. R., Domínguez, M. A. P., Rosales, S. R., Flores, G. R. (2014). Nutrición mineral en el ganado bovino. Folleto Técnico Num. 75. Impreso en México. INIFAP.
46. Jin, Y., Zhou, Y. (2022). Effects of concentrate level and chromium-methionine supplementation on the performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, blood metabolites, and meat quality of Tan lambs. *Animal Bioscience*, Vol. 35, No. 5:677-689. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0802>.
47. Kegley, B. E., Silzell, A. S., Kreider, L. D., Galloway, L. D., Coffey, P. K., Hornsby, A. J., Hubbell, S. D. (2001). The Immune Response and Performance of Calves Supplemented with Zinc from an Organic and an Inorganic Source. *The Professional Animal Scientist* 17:33–38
48. Kessler, J., Morel, I., Dufey, P. A., Gutzwiller, A., Stern, A., Geyer, H. (2003). Effect of organic zinc sources on performance, zinc status and carcass, meat and claw quality in fattening Bulls. *Livestock Production Science*. No. 81. Pp. 161-171.
49. Krebs, F. N. (2000). Overview of Zinc Absorption and Excretion in the Human Gastrointestinal Tract. *American Society for Nutritional Sciences. J. Nutr.* 130: 1374S—1377S.
50. Lashkari, S., Habibian, M., Krogh, J. S. (2018). A Review on the Role of Chromium Supplementation in Ruminant Nutrition—Effects on Productive Performance, Blood Metabolites, Antioxidant Status, and

Immunocompetence. Biological Trace Element Research. No. 186:305–321.  
<https://doi.org/10.1007/s12011-018-1310-5>.

51. Lehninger, L. A., Nelson, L. D., Cox, M. M. (1993). Capítulo 5. Amino Acids and Peptides. En Principles of Biochemistry. 2ª Ed. Worth Publishers, Impreso en USA. Pp. 111, 112.
52. Liefers, C. S., Pas, W. F. M., Veerkamp, F. R., Van der Lende, R. (2002). Associations between Leptin Gene Polymorphisms and Production, Live Weight, Energy Balance, Feed Intake, and Fertility in Holstein Heifers. J. Dairy Sci. Vol. 85 No. 6:1633–1638.
53. Liu, Y., Chen, W., Zhang, S., Zhu, X., Wu, H., Meng, Q., Zahoor, K. M., Yu, Z., Zhou, Z. (2024). N-acetyl-L-methionine dietary supplementation improves meat quality by oxidative stability of finishing Angus heifers. Meat Science 214. 109499. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109499>.
54. Ma, F.T., Wo, Y. Q. L., Shan, Q., Wei, J. Y., Zhao, S. G., Sun, P. (2020). Zinc-methionine acts as an anti-diarrheal agent by protecting the intestinal epithelial barrier in postnatal Holstein dairy calves. Animal Feed Science and Technology. Vol. 270 114686. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114686>.
55. Macedo, M. L. F., Moreira, B. C., Almeida, A. P., Henrique, S. M., Novais, F. J., Toriyama, E., Viera, P. A., da Luz, S. S., Roberto, L. P., Sterman, F. J. B., Fukumasu, H. (2017). Circulating leptin and its muscle gene expression in Nellore cattle with divergent feed efficiency. Journal of Animal Science and Biotechnology 8:71. DOI 10.1186/s40104-017-0203-3.
56. Malik, M., Jonker, A., Raboisson, D., Song, B., Rashid, M. A., Sun, X. (2024). Effects of dietary chromium supplementation on blood biochemical parameters in dairy cows: A multilevel meta-analytical approach. J. Dairy Sci. 107:301-316. Pp. 301, 306-311, 314.
57. McDonald, P., Edwards, R.A., Greenhalgh, J.F.D., Morgan, C.A. (2006). Minerales. En Nutrición animal (6ª Ed.). Pp: 91-120. Editorial Acribia S.A.

58. Mendoza, M. D. G., Hernández, G. P. A., Plascencia, J. A., Shimada, M. A. (2018). Alimentación de ganado productor de carne. En Shimada M.A. (Ed.) Alimentación Animal (pp. 212). Editorial Trillas. Impreso en México.
59. Mertz, W., Roginski, E. E., Schwarz, K. (1960). Effect of Trivalent Chromium Complexes on Glucose Uptake by Epididymal Fat Tissue of Rats. The Journal of Biological Chemistry. Vol. 236. No. 2. Pp. 318-322.
60. Messersmith, M. E., Niedermayer, K. E., Thornton, J. K., Crawford, I. G., Hansen, L. S. (2021). Zinc supplementation strategies in feedlot heifers receiving an extended-release implant or an aggressive re-implant program. Journal of Animal Science, Vol. 99, No. 8, 1–8. <https://doi.org/10.1093/jas/skab212>.
61. Messersmith, M. E., Smerchek, T. D., Hansen, L. S. (2022). Effects of increasing supplemental zinc in beef feedlot steers administered a steroidal implant and beta agonist. Translational Animal Science. 6, 1–10 <https://doi.org/10.1093/tas/txac029>.
62. Monroy, A. V. (1986). Los Micronutrientes y los aditivos. En Shimada S. A., Rodríguez G. F., Cuarón I. J. A. (Eds.), Engorda de ganado bovino en corrales (pp. 161-174). Editorial Consultores en Producción Animal S.C.
63. Montaña, F. M., Plascencia, A., Salinas, C. J., Torrentera, N., Zinn, R. A. (2017). Influence of level and form of supplemental zinc on feedlot growth performance and carcass characteristics of calf-fed Holstein steers. The Professional Animal Scientist. 33: 651-658. <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01640>.
64. Monterrosa, D. V. H. (2008). Efecto de la suplementación con metionina de cromo en la respuesta productiva y características de la canal de toretes finalizados con dietas adicionadas con clorhidrato de zilpaterol. (Tesis de Maestría). Universidad de Guadalajara.
65. Mora, I. O., Shimada, M. A. (2018). Metabolismos. En Shimada M. A. (Ed.). Nutrición Animal. Editorial Trillas. Impreso en México. Pp: 184.

66. Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG-ZOO-2014. Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres. Consultado el 20 de junio 2014. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5405210&fecha=26/08/2015#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5405210&fecha=26/08/2015#gsc.tab=0)
67. NRC, 2000. Nutrient requirements of beef cattle. 7th ed. update. National Research Council, National Academy Press, Washington DC. 242 pp.
68. Oconitrillo, M., Wickramasinghe, J., Omale, S., Beitz, D., Appuhamy, R. (2024). Effects of Elevating Zinc Supplementation on the Health and Production Parameters of High-Producing Dairy Cows. *Animals* Vol.14, 395. <https://doi.org/10.3390/ani14030395>.
69. Ohh, J. S., Lee, Y. J. (2005), Dietary Chromium-methionine Chelate Supplementation and Animal Performance. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* Vol 18, No. 6 : 898-907.
70. Park, B. K., Ahn, J. S., Kim, M.J., Son, G. H., Bong, S. H., Gil, D. Y., Park, J. K., Lee, C. W., Kwon, E. G., Chang, S. S., Shin, J. S. (2020). Effect of Rumen Protected Methionine and  $\alpha$ -Tocopherol on Growth Performance, Carcass Characteristics, and Meat Composition of Late Fattening Hanwoo Steer in High-Temperature Seasons. *Animals*, 10 (12), 2430. <https://doi.org/10.3390/ani10122430>.
71. Pollard, G. V., Richardson, C. R., Karnezos, T. P. (2002). Effects of supplemental organic chromium on growth, feed efficiency and carcass characteristics of feedlot steers. *Animal Feed Science and Technology* No. 98. Pp. 121–128.
72. Rodwell, W. V. (1997). Aminoácidos. En: *Bioquímica de Harper*. 14<sup>a</sup> Ed. Editorial El Manual Moderno, S.A. de C. V., Impreso en México. Pp: 29, 31.
73. Salinas, C. J., Carvalho, V. H. P., Latack, C. B., Ferraz, V. C. M., Montaña, M. J., Zinn, A. R. (2024). Influence of metabolizable protein and methionine supplementation on growth-performance of Holstein steer calves during the

initial 112-d feedlot growing phase. Translational Animal Science. 8, txae003  
<https://doi.org/10.1093/tas/txae003>.

74. Samuelson, K. L., Hubbert, M. E., Galyean, M. L., Löest, C. A. (2016). Nutritional recommendations of feedlot consulting nutritionists: The 2015 New Mexico State and Texas Tech University survey. J. Anim. Sci. 94:2648– 2663. doi:10.2527/jas2016-0282.
75. SAS Institute, Inc. 1990. SAS User's Guide: Statistical Version 9. Cary, North Carolina, U.S.A.
76. Schulte, D. M., Hochmuth, G. K., Steadham, M. E., Prusa, J. K., Lonergan, M. S., Hansen, L. S., Huff-Lonergan, J. E. (2023). Carcass Characteristics and Quality Attributes of Beef From Cattle Supplemented Zinc and Ractopamine Hydrochloride. Meat and Muscle Biology 7(1): 14457, 1–14. doi:10.22175/mmb.14457.
77. Schwarz, K., Mertz, W. (1959) Chromium(III) and glucose tolerance factor. Arch. Biochem. Biophys. 85: 292–295.
78. Shimada, A. M. (2018). Importancia e historia de la nutrición. (4ª Ed.). En Shimada M. A. (Ed.). Nutrición Animal (pp. 17). Editorial Trillas. Impreso en México.
79. Smock, M. T., Samuelsson, L. K., Hergenreder, E. J., Whitney, R. P., Richeson, T. J. (2020). Effects of *Bacillus subtilis* PB6 and/or chromium propionate supplementation on clinical health, growth performance, and carcass traits of high-risk cattle during the feedlot receiving and finishing periods. Transl. Anim. Sci. No. 4:1-12. doi: 10.1093/tas/txaa163
80. Spears, W. J., Whisnant, S. C., Huntington, B. G., Lloyd, E. K., Fry, S. R., Krafka, K., Lamptey, A., Hydat, J. (2012). Chromium propionate enhances insulin sensitivity in growing cattle. J. Dairy Sci. 95: 2037-2045. (Pp: 2037-2044).
81. Spears, W. J., Lloyd, E. K., Krafka, K. (2017). Chromium concentrations in ruminant feed ingredients. J. Dairy Sci. 100: 3584-3590.

82. Stahlhut, H. S., Whisnant, C. S., Spears, J. W. (2006). Effect of chromium supplementation and copper status on performance and reproduction of beef cows. *Animal Feed Science and Technology*. No. 128. Pp. 266-275.
83. Suárez, D. H. (2023). Alimentación eficaz de ganado bovino en corral. Ophelia casa editorial. Impreso en Columbia, SC., USA. Pp. 52, 88, 97.
84. Tantawi, A. A., Imbabi, T. A., Zounouny A. I., Abd El- Rahman, A.A., El- Shafei, S. M. A., Abdelhakeam, M. A. (2023). Impact of Organic Chromium and Zinc on Growth Performance, Feed Intake, Hematological Profiles and Biochemical Indices of Growing Zaraibi Male Goats. *J. of Animal and Poultry Production, Mansoura Univ.*, Vol . 14 (10):125 – 134. DOI: 10.21608/jappmu.2023.234945.1091.
85. Tejada C. I., Shimada M. A. (2018), Alimentos: su composición y cómo evaluarlos. En Shimada M.A. (Ed.) Alimentación Animal (pp. 53:54). Editorial Trillas. Impreso en México.
86. Torrentera, N., Carrasco, R., Salinas, C. J., Plascencia, A., Zinn, A. R. (2017). Influence of methionine supplementation of growing diets enriched with lysine on feedlot performance and characteristics of digestion in Holstein steer calves. *Asian-Australas J. Anim. Sci.* Vol. 30. No. 1:42-50.
87. Trojan, J. S., Hergenreder, E. J., Canterbury, G. L., Leonhard, T. J., Clark, D. W., Beckett, L. J., Long, M. J. (2023). The effects of chromium propionate supplementation to yearling steers in a commercial feedyard on growth performance, carcass characteristics, and health. *American Society of Animal Science*. <https://doi.org/10.1093/tas/txad078>
88. Underwood, E. J. y Suttle, N. F. (2003). Los minerales en la nutrición del Ganado (3ª Ed.). Editorial Acribia S.A. de C.V. Zaragoza, España.
89. Urso, M. P., Kim, J., Legako, F. J., Wellman, B. K., Fuerniss, K. L., Johnson, J. B. (2024). Chromium and Methionine Effects on Amino Acid Uptake, Gene Expression, and Protein Abundance in Bovine Satellite Cells. *Meat and Muscle Biology* 8(2): 17748, 1–11. doi:10.22175/mmb.17748.

90. Vellini, L. B., Prados, F. L., Monção, P. F., Fireman, K. A., Resende, D. F., Siqueira, R. G. (2020). Zinc amino acid complex in association with chromium methionine improves the feed efficiency of finished Nellore cattle in the feedlot. *Animal Feed Science and Technology*. Vol. 262. 114430. ISSN 0377-8401.
91. Vincent, B. J. (2000). *The Biochemistry of Chromium*. American Society of Nutritional Sciences. 022-3166/00 715-718.
92. Wang, Q. Z., Zhang, H. X., Russel, C. J., Hulver, M., Cefalu, T. W. (2006). Chromium Picolinate Enhances Skeletal Muscle Cellular Insulin Signaling In Vivo in Obese, Insulin Resistant JCR:LA-co Rats. *American Society for Nutrition*. 022-3166/06 415-420.
93. Wellmann, B. K., Baggerman, O. J., Burson, C. W., Smith, K. Z., Kim, J., Hergenreder, E. J., Rounds, W., Bernhard, C. B., Johnson, J. B. (2020). Effects of zinc propionate supplementation on growth performance, skeletal muscle fiber, and receptor characteristics in beef steers. *Journal of Animal Science*. Vol. 98, No. 7, 1–9. <https://doi:10.1093/jas/skaa210>.
94. Whitman, K. J., Engle, T. E., Burns, P. D., Dorton, K. L., Ahola, J. K., Enns, R. M., Stanton, T. L. (2007). Effects of Copper and Zinc Source on Performance, Carcass Characteristics, and Lipid Metabolism in Finishing Steers. *The Professional Animal Scientist* 23:36–41
95. Wright, L. C. y Spears, W. J. (2004). Effect of Zinc Source and Dietary Level on Zinc Metabolism in Holstein Calves. *Journal of Dairy Sci.* 87: 1085-1091. Pp.1087-1090.
96. Zhang, Y., Ward, T. L., Ji, F., Peng, C., Zhu, L., Gong, L., Dong, B. (2018). Effects of zinc sources and levels of zinc amino acid complex on growth performance, hematological and biochemical parameters in weanling pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(8), 1267-1274. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0739>