

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL



Efecto del óxido de magnesio sobre el pH ruminal y la digestibilidad in vivo en novillos charoláis en condiciones de corral

Por:

Esmeralda Guadalupe Martinez Perez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Efecto del óxido de magnesio sobre el pH ruminal y digestibilidad in vivo en novillos
charoláis en condiciones de corral

Por:

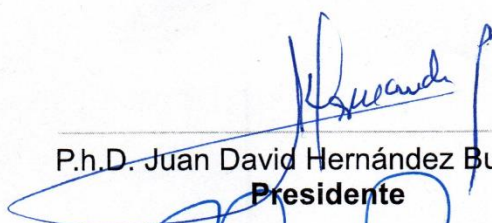
Esmeralda Guadalupe Martinez Perez

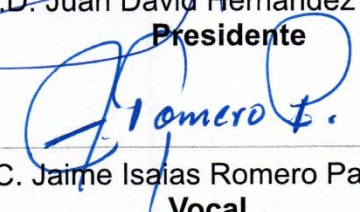
TESIS

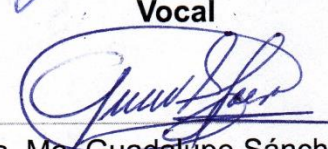
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

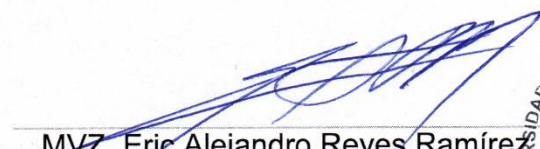
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por:


P.h.D. Juan David Hernández Bustamante MVZ. Federico Antonio Hernández Torres
Presidente **Vocal**


M.C. Jaime Isaias Romero Paredes Rubio
Vocal


Dra. Ma. Guadalupe Sánchez Loera
Vocal suplente


MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Efecto del óxido de magnesio sobre el pH ruminal y la digestibilidad in vivo en novillos
charoláis en condiciones de corral

Por:

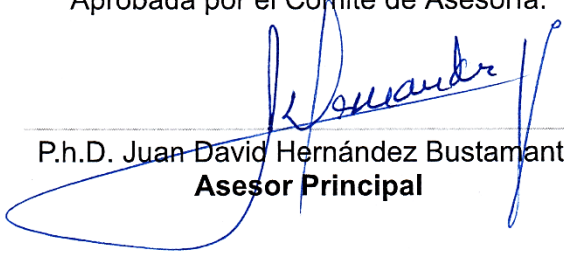
Esmeralda Guadalupe Martinez Perez

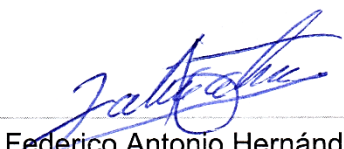
TESIS

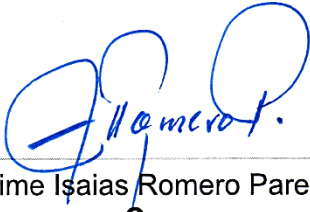
Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el Comité de Asesoría:


P.h.D. Juan David Hernández Bustamante
Asesor Principal


MVZ. Federico Antonio Hernández Torres M.C. Jaime Isaias Romero Paredes Rubio
Coasesor


Coasesor


MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme abierto las puertas y cobijarme en sus aulas, permitiéndome formarme no solo como profesionista, si no como persona.

A mi asesor de tesis, el PhD Bustamante quien con su apoyo, confianza y enseñanza me motiva a seguir preparándome como profesionista. Por su invaluable guía, su paciencia y por permitirme ser parte de este proyecto, por compartir conmigo su conocimiento para llevar a buen término esta investigación.

A los médicos, compañeros de trabajo, clínicas y personal del zoológico que me acompañaron en cada jornada de aprendizaje, su conocimiento sembró en mí el verdadero amor por la práctica veterinaria.

A mi familia que siempre estuvo apoyándome a no rendirme y seguir avanzando hacia mi sueño.

DEDICATORIAS

A mí misma, por la fortaleza demostrada en cada noche de desvelo, por no rendirme cuando el cansancio físico y mental parecía ganarles a mis sueños, y por mantener intacta la pasión por esta hermosa profesión. A mis padres que con su ejemplo me enseñaron que la disciplina y el amor son las llaves para abrir cualquier puerta. Gracias por ser mi motor y mi inspiración diaria, por siempre creer en mí y en que puedo lograr cada objetivo que me proponga.

A mis amigos que siempre me apoyaron a lo larga de la carrera, me apoyaron, me consolaron y me felicitaron en cada momento en que lo necesite, lluvia, Emmanuel, Estrella, Alejandra, Giuliana, por cada vez que me apoyaban y me cuidaban, no solo cuidaban de mí, también me enseñaban como mejorar cada día. A ver la vida de otra manera, por estar para mí cada vez que lo necesite.

A mis padres María y Clemente, por su confianza incondicional hacia mí, por permitirme vivir diferentes tipos de experiencias lejos de casa, a mis hermanos Jesús y Pablo que siempre me apoyaron para que en algún momento sea una buena persona, como una buena medico veterinaria.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo de evaluar la inclusión de óxido de magnesio (MgO) como aditivo alcalinizante exógeno sobre la cinética del pH ruminal y la degradabilidad *in situ* de la materia seca (DMS) en novillos de la raza Charoláis en condiciones de corral de finalización. La fase de campo se llevó a cabo en el Centro de Reproducción de Bovinos (CRB) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Se utilizaron novillos provistos con una cánula ruminal permanente, evaluando dos tratamientos: una dieta control (Mezcla 5 - CHAPO) y una dieta experimental con la adición homogénea de MgO (Mezcla 6 - CAIN). Para determinar la DMS se empleó la técnica *in situ* de las bolsas de nylon de Ørskov, utilizando un total de 36 réplicas incubadas cronológicamente a las 0, 4, 8, 12, 24 y 48 horas post-ingesta, procesadas en el Laboratorio de Bromatología de la institución. Paralelamente, se realizó el monitoreo del pH del fluido ruminal en los mismos intervalos de tiempo empleando un potenciómetro digital.

Los resultados cinéticos del pH evidenciaron una mayor estabilidad en el animal suplementado con MgO (CAIN), manteniendo un pH de 6.7 a las 8 h y finalizando en 7.3 a las 48 h, mientras que el testigo (CHAPO) sufrió un descenso gradual hasta alcanzar un punto crítico de 5.9 a las 12 h. Respecto a la degradabilidad, a las 48 h de incubación intraluminal se registraron coeficientes sobresalientes de DMS en ambos tratamientos, alcanzando un 77.15% para la Mezcla 5 y un 74.96% para la Mezcla 6. Se concluye que la suplementación con óxido de magnesio constituye una estrategia nutricional eficaz y segura para mitigar la acidez del entorno retículo-ruminal en bovinos productores de carne bajo dietas densas en energía, sin mermar ni interferir negativamente en los procesos de digestión microbiana de la materia seca de la ración.

Palabras Clave: Digestibilidad, pH, Buffers, MgO, Acidosis Ruminal, Neutralizador

ABSTRACT

The present research work was carried out with the objective of evaluating the inclusion of magnesium oxide (MgO) as an exogenous alkalizing additive on the kinetics of rumen pH and the in situ degradability of dry matter (DMS) in steers of the Charolais breed under finishing pen conditions. The field phase was carried out at the Bovine Reproduction Center (CRB) of the Antonio Narro Autonomous Agrarian University, Laguna Unit. Steers provided with a permanent rumen cannula were used, evaluating two treatments: a control diet (Mix 5 - CHAPO) and an experimental diet with the homogeneous addition of MgO (Mix 6 - CAIN). To determine the AMD, the in situ technique of Ørskov's nylon bags was used, using a total of 36 replicates incubated chronologically at 0, 4, 8, 12, 24 and 48 hours post-ingestion, processed in the Laboratory of Bromatology of the institution. At the same time, the pH of the rumen fluid was monitored at the same time intervals using a digital potentiometer.

The kinetic results of the pH showed greater stability in the animal supplemented with MgO (CAIN), maintaining a pH of 6.7 at 8 h and ending at 7.3 at 48 h, while the control (CHAPO) suffered a gradual decrease until reaching a critical point of 5.9 at 12 h. Regarding degradability, at 48 h of intraluminal incubation, outstanding DMS coefficients were recorded in both treatments, reaching 77.15% for Mixture 5 and 74.96% for Mixture 6. It is concluded that magnesium oxide supplementation is an effective and safe nutritional strategy to mitigate the acidity of the reticulo-ruminal environment in beef-producing cattle under energy-dense diets, without reducing or negatively interfering with the microbial digestion processes of the dry matter of the ration.

Keywords: Digestibility, pH, Buffers, MgO, Ruminal Acidosis, Neutralizer

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.2 HIPÓTESIS	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivos Específicos	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El Sistema Digestivo Del Rumiante Y La Fermentación	4
2.2 Etiología De La Acidosis Ruminal Subaguda (SARA).	6
2.2.1 Dinámica Del Ph Ruminal Y Ácidos Grasos Volátiles (Agvs)	9
2.3 El Novillo Charoláis: Características Y Exigencias Nutricionales En Corral.	12
2.4 Agentes Alcalinizantes Y Buffers En La Nutrición Animal.	14
2.4.1 Propiedades Químicas Y Biológicas Del Óxido De Magnesio (MgO).	16
2.5 Métodos Para Evaluar La Digestión Y La Degradabilidad In Situ De Los Alimentos	18
2.5.1 Fundamentos Biofísicos Y Dinámicos De La Técnica De Las Bolsas De Nylon (Ørskov)	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Generalidades	25
3.2 Localización	25
3.3 Manejo	25
3.4 Preparación	26
3.5 Incubación Ruminal Y Remoción Cronológica	26
3.6 Procesamiento Analítico	27
3.7 Monitoreo Del Ph	27
4. RESULTADOS	28
4.1 Monitoreo Del pH Ruminal	28

4.2 Coeficientes De Degradabilidad In Situ De La Materia Seca (DMS)-----	29
5. DISCUSIÓN -----	31
6. CONCLUSIONES-----	33
7. LITERATURA CITADA -----	35

1. INTRODUCCIÓN

Se llevo a cabo una investigación experimental con el objetivo de evaluar el (MgO) como agente alcalinizante para regular el pH ruminal, aliviar los impactos de la acidosis subaguda y mantener el equilibrio de la comunidad microbológica del rumen, mejorando así los coeficientes de digestibilidad y la utilización biológica de los nutrientes. La fase practica se ejecutó utilizando aparatos de acero equipados con cánulas ruminales permanentes, empleando la metodología de bolsas de nylon in situ explicada por Ørskov. Para ello, 24 horas antes se prepararon meticulosamente un total de 36 bolsas de porosidad controlada en las instalaciones del laboratorio de bromatología y nutrición animal de la institución.

Justificación

La producción intensiva de carne de corral exige el uso de dietas con altas densidades energéticas, compuestas principalmente por granos ricos en almidón. Si bien esto acelera la ganancia de peso en los novillos de razas pesadas como el charoláis, también incrementa drásticamente el riesgo de acidosis ruminal subaguda (SARA). Este trastorno metabólico provoca una caída de pH ruminal, dañando la mucosa del rumen y reduciendo la capacidad del animal para aprovechar los nutrientes.

1.2 HIPÓTESIS

La suplementación con óxido de magnesio MgO en dietas de finalización para novillos charoláis bajo condiciones de corral, actúa como agente alcalinizante efectivo que incrementa significativamente el pH ruminal, reduciendo la incidencia de acidosis subclínica y mejorando la digestibilidad in situ en comparación de una dieta sin aditivo.

1.3 OBJETIVOS

Determinar el efecto de la inclusión de óxido de magnesio MgO en la dieta sobre la variación de pH ruminal y el coeficiente de digestibilidad in situ total aparente en novillos charoláis finalizados en corral con dietas altas en granos.

1.3.1 Objetivos Específicos

Monitorear el pH ruminal

Determinar los coeficientes de degradabilidad ruminal in situ de la materia seca.

Evaluar el desempeño productivo

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Sistema Digestivo Del Rumiante Y La Fermentación

Los rumiantes (Suborden Ruminantia) poseen un sistema digestivo con una evolución única, caracterizada por un estómago multicámara que incluye tres compartimentos anteriores o preestómagos de origen ectodérmico (abomaso) (McCann et al., 2016; Van Amburgh y Ross, 2019). Esta disposición anatómica especializada permite a estos animales utilizar eficazmente los carbohidratos estructurales que se encuentran en las paredes celulares de las plantas, como la celulosa, la hemicelulosa y la pectina (Mizrahi et al., 2021; Academias Nacionales de Ciencias Ingeniería Y Medicina [NASEM]. 2016). Estos materiales complejos son biológicamente indigeribles para los mamíferos monogástricos porque carecen por completo de enzimas y hemicelulolíticas endógenas en sus fluidos digestivos (Owens et al., 2020; Shike, 2019).

El rumen funciona como una cámara de fermentación anaeróbica continua a gran escala (Mizrahi et al., 2021; Wang y McAllister, 2020). Para garantizar la supervivencia y la multiplicación del intrincado ecosistema simbiótico que contiene este órgano mantiene parámetros homeostáticos y fisicoquímicos estrictamente controlados: una temperatura estable entre 38 y 41 °C, un potencial redox significativamente negativo (de - 250 a - 400 mV) que favorece una anaerobiosis estricta y un volumen de líquido gestionado por el tránsito y la secreción salival del sistema digestivo (McCann et al., 2016; Valenzuela y Arias, 2021). Este entorno único sirve como nicho ecológico para un consorcio microbiano excepcionalmente denso y variado, que incluye bacterias anaeróbicas (que van desde 10^{10} a 10^{11} células/mL), protozoarios ciliados (10^5 a 10^6 células/ mL), hongos anaerobios (10^3 a 10^5 zoosporas/mL) y arqueas metanogénicas (Li y Khafipour, 2019; Mizrahi et al., 2021).

El proceso de fermentación microbiana se basa en la descomposición de la materia seca a través de enzimas extracelulares (incluidas celulasas, xilanasas, amilasas y

pectinasas) que son producidas y liberadas por microorganismos que se adhieren al sustrato (Krizasan et al., 2016; Oh et al., 2019). La hidrólisis de estos polisacáridos estructurales produce oligosacáridos y monosacáridos libres, que luego son absorbidos y utilizados por la vía de Embden-Meyerhof-Parnas (glucólisis) por la microbiota ruminal, lo que resulta en la formación de ácidos volátiles (AGV), principalmente acetato (CH_3COO^-), propionato ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-$) y butirato ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$), además de gases de desecho como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (NASEM, 2016; Owens et al., 2020).

Los AGV constituyen la principal fuente de energía neta para el organismo del huésped y contribuyen entre el 60 y el 80 % de las necesidades metabólicas diarias tras su absorción a través del epitelio escamoso estratificado queratinizado del rumen (Penner et al., 2024; Snyder y Krehbiel, 2022). La proporción molar en la que se sintetizan estos ácidos está intrínsecamente vinculada a los componentes químicos de la ración dietética y a la velocidad de paso (Beauchemin, 2018; Ramos y Owens, 2021). Cuando la composición de la dieta es predominante de forrajes fibrosos, fomenta un ambiente con un pH casi neutro (6.2 a 6.8), lo que favorece la proliferación de bacterias celulolíticas (como *Fibrobacter succinogenes* y *Ruminococcus albus*), lo que produce un perfil de fermentación claramente acetogénico caracterizados por una relación acetato: propionato superior a 3:1 (McCann et al., 2016; Mizrahi et al., 2021).

Por el contrario, la amplia inclusión de carbohidratos no estructurales altamente fermentables (como almidones, y azúcares solubles) en las dietas del ganado altera fundamentalmente la ecología y el equilibrio del rumen (Arias et al., 2019; Ramos y Owens, 2021). La prevalencia de sustratos solubles desplaza la proliferación microbiana hacia poblaciones de bacterias amilolíticas (incluidas *Streptococcus bovis*, *Ruminobacter amylophilus* y *Succinibacillus* spp.) modificando las vías metabólicas y aumentando la producción de propionato a través de las vías del succinato o el acrilato (Mizrahi et al., 2021; Wang y McAllister, 2020).

Si bien el propionato sirve como el [principal precursor gluconeogénico en el metabolismo hepático bovino y promueve el aumento de grasa corporal magna, su tasa de síntesis conduce a una liberación significativa de iones de hidrógeno (H^+) en el líquido ruminal (Owens et al., 2020; Penner et al., 2024). Si se superan los mecanismos de absorción epitelial y la capacidad de amortiguación salival, se produce una disminución drástica del pH ruminal, lo que pone en peligro la estabilidad fisiológica del organismo (Arias et al., 2019; Valenzuela y Arias, 2021).

2.2 Etiología De La Acidosis Ruminal Subaguda (SARA).

La acidosis ruminal subaguda (SARA) representa un trastorno metabólico, microbiológico y relacionado con la productividad, importante y etimológicamente complejo en el sector de la producción de carne, particularmente en los sistemas caracterizados por el confinamiento y la intensificación (Coon et al., 2019; Humer et al., 2018).

Desde el punto de vista de la etiología nutricional, este síndrome es provocado por una alteración repentina o un suministro prolongado de dietas que contienen una proporción excesivamente alta de concentrados derivados de granos de cereales procesados mecánicamente, (como la molienda, el laminado de granos o el laminado al vapor), junto con un suministro inadecuado de fibra físicamente eficaz (peNDF) (Beauchemin, 2018; Penner et al., 2024).

El peNDF presente en el forraje estimula los procesos mecánicos de la masticación y la rumia debido a su tamaño de partícula y su estructura física. Esta estimulación da lugar a un aumento de la producción de saliva, rica en iones de bicarbonato (HCO_3^-) y fosfato disódico (Na_2HPO_4). Estos iones son fundamentales para el principal tampón endógeno del rumen. (Cavedo et al., 2020; Plaizier et al., 2018).

Cuando se reduce la masticación debido a la ausencia de fibra efectiva y se acelera la hidrólisis del almidón por el procesamiento del grano, aumenta exponencialmente la velocidad de producción de AGVs en el lumen ruminal (Plaizier et al., 2018; Ramos y Owens, 2021). Desde el punto de vista fisiopatológico, la acumulación de estos ácidos rompe el balance químico intracapsular y libera protones (H^+), los cuales reducen el pH del líquido libre (Humer et al., 2018; Oetzel y Krause, 2017). Diagnosticado, SARA se caracteriza por ser un estado de disfunción ruminal en el que el pH del líquido baja y se sostiene en un rango crítico de 5.2 a 5.6 durante periodos acumulados o continuos que superan las 3 o 4 horas en una jornada de 24 horas (AlZahal et al., 2016; Penner et al., 2024).

Es fundamental que se haga una diferencia clara entre la acidosis ruminal aguda y SARA en términos de fisiopatología y patología (Coon et al., 2019; Enemark y Oetzel, 2020). La acidosis aguda se caracteriza por la multiplicación descontrolada de *Lactobacillus* spp. y *Streptococcus bovis*, lo que causa una acumulación anormal de ácido láctico (un ácido con un pKa de 3.86, notablemente más fuerte que el de los AGVs, cuyo pKa es aproximadamente 4.8), lo que lleva a la caída del pH por debajo de 5.0, a una grave deshidratación sistémica y a una elevada tasa de mortalidad (Enemark y Oetzel, 2020; Humer et al., 2018).

En contraste, el modelo fisiopatológico del SARA está determinado casi exclusivamente por la acumulación total y la tasa inadecuada de remoción de los AGVs convencionales (propionato, butirato y acetato), en los cuales el líquido ruminal presentaba concentraciones mínimas o inexistentes de ácido láctico (Alzahal et al., 2016; Plaizier et al., 2018).

La existencia continua de un pH por debajo de 5.6 durante un tiempo extenso provoca una serie de efectos perjudiciales en la integridad tisular y sistémica del bovino (Penner et al., 2024; Wood y K.M Wood, 2023). En primer lugar, la acidez luminal mantenida genera un gran impacto citotóxico directo en las células epiteliales del rumen, lo cual causa que las papilas ruminales se inflamen y descamen posteriormente (rumenitis parakeratosis) (Castillo-Lopez et al., 2021; Penner et al., 2024). Este daño en el tejido afecta de manera grave las uniones estrechas entre células (tight junctions), que funcionan como una barrera selectiva semipermeable para evitar que elementos dañinos entren al sistema portal sanguíneo (Chang y Shen, 2021; Wood y Wood, 2023).

Cuando la integridad de la barrera epitelial, se produce la translocación de bacterias viables (como *Fusobacterium necrophorum*) y de componentes de la pared celular bacteriana, en particular los lipopolisacáridos (LPS o endotoxinas que se liberan cuando las bacterias gram negativas sensibles al ácido son lisadas), pasan directamente al torrente sanguíneo (Chang y Shen, 2021; Plaizier et al., 2018).

Cuando las endotoxinas ingresan a la circulación sistémica por medio del sistema venoso portal, provocan que el hígado y los tejidos periféricos respondan con una inflamación de fase aguda (Amachawadi y Nagaraja, 2016; Zhang y Krehbiel, 2022). Esto se traduce clínicamente en una alteración de los parámetros hematológicos, así como en fluctuaciones drásticas e impredecibles en el consumo voluntario de alimentos.

También se observa una reducción significativa en la digestibilidad total de la materia seca de la dieta, atribuida a la mortandad de los microorganismos fibrolíticos. Además, se presentan cojeras crónicas debido a infusura o laminitis aséptica, abscesos hepáticos y el síndrome de emaciación del ganado en corral, lo que afecta de manera considerable la rentabilidad de las empresas ganaderas y el bienestar animal (Amachawadi y Nagaraja, 2016; Coon et al., 2019; Penner et al., 2024).

2.2.1 Dinámica Del Ph Ruminal Y Ácidos Grasos Volátiles (AGVs)

El equilibrio de la acidez en el medio retículo-ruminal se rige por una interacción sofisticada entre las tasas de generación de ácidos grasos volátiles (AGV) por parte de la microbiota y la tasa global de eliminación de iones de hidrógeno mediante la absorción epitelial, el tránsito a los compartimentos

posteriores y la amortiguación salival (Castillo-Lopez et al., 2021; Penner et al., 2024). En escenarios típicos de alimentación, el pH del rumen sufre variaciones fisiológicas cíclicas a lo largo del día, que se vuelven significativamente pronunciada tras el consumo de dietas concentradas en regímenes de engorde intensivos (AlZahal et al., 2016; Valenzuela y Arias, 2021). Cuando se introducen carbohidratos no estructurales de rápida fermentación, la tasa de descomposición microbiana del almidón supera la capacidad inherente del ecosistema para metabolizar los subproductos, lo que altera el equilibrio químico dentro del lumen (Arias et al., 2019; Ramos y Owens, 2021).

Desde la perspectiva fisiológica, los ácidos grasos primarios de cadena corta producidos en el rumen (a saber, acetato, propionato y butirato) existen simultáneamente en la fase acuosa en dos formas químicas distintas influenciadas por el pH del medio: una forma iónica o disociada (A^-) y una forma no disociada o lipofílica (HA). Este equilibrio se rige meticulosamente por su constante de disociación ácida, o valor del pKa, que se sitúa constantemente dentro del rango de 4.8 a 4.9 (Bach et al., 2020; Oetzel Y Krause, 2017).

Cuando el pH ruminal se mantiene en niveles fisiológicos óptimos (superiores a 6.2), más del 90% de los ácidos grasos de cadena corta están presentes en su estado iónico disociado, lo que requiere la participación de mecanismos de transporte activos facilitados por los transportadores de intercambio en las membranas de las células epiteliales (por ejemplo, el intercambiador de bicarbonato/ monocarboxilato-1 MCT1) para su absorción en la circulación portal (Snyder y Krehbiel, 2022; Wood y Wood, 2023).

Sin embargo, a medida que la velocidad de la fermentación amilácea se intensifica y la concentración absoluta de ácidos grasos volátiles totales (AGV) aumenta (que puede pasar de un rango normativo de 70 a 100 mM a superar niveles de 150 mM), el excedente de iones de hidrógeno libres (H^+) satura el líquido ruminal y precipita una disminución significativa y sostenida del pH (Coon et al., 2019; Plaizier et al., 2018). A medida que el pH del medio disminuye y se acerca al valor de pK_a de los ácidos (4.8), el equilibrio químico sufre un cambio sustancial que favorece la producción de los AGV en su forma no ionizada (HA) (Bach et al., 2020; Castillo-Lopez et al., 2021). Las entidades no ionizadas muestran una lipofilia elevada, lo que facilita su translocación sin esfuerzo a través de la membrana plasmática apical de los colonocitos ruminales mediante una simple difusión pasiva, lo que evita la necesidad de mecanismos de transporte específicos (Snyder y Krehbiel, 2022; Wood y Wood, 2023).

El aumento considerable y desregulado de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) no ionizados en el medio citoplasmático de las papilas ruminales incita a un fenómeno de pronunciada acidificación intracelular (Chang y Shen, 2021; Penner et al., 2024). Dado que el pH interno de la célula epitelial permanece neutro (dentro del rango de 7.0 a 7.4). Las moléculas de AGV que penetran por difusión pasiva se disocian rápidamente dentro del citoplasma generando una liberación sustancial de protones (H^+) internamente (Snyder y Krehbiel, 2022). En respuesta a la amenaza de muerte celular inducida por la acidosis, los queratinocitos utilizan mecanismos de gasto de energía (incluido el intercambiador de sodio e hidrógeno, NHE, la bomba ATP de protones) para eliminar el exceso de acidez en los compartimientos basolaterales e intersticial (Chang y Shen, 2021; Wood y Wood, 2023).

En los casos en que la disminución del pH dentro del fluido luminal es persistente (como se observa en la SARA prolongada), los mecanismos de transporte celular se agotan como resultado de la falta de energía o de la saturación química del tejido. Esto provoca la inflamación celular, la desintegración de las capas espinosas y granulosa y la posterior ruptura de las uniones estrechas formadoras por ocludinas (Chang y Shen, 2021; Penner et al., 2024).

Una vez que la barrera física se ve comprometida, el líquido ruminal ácido, plagado de bacterias y lipopolisacáridos endotoxinas, se infiltra en los capilares sanguíneos de la submucosa, lo que provoca una respuesta inflamatoria sistémica y manifiesta las enfermedades hepáticas y pediátricas típicas que se observan en el ganado dentro de los corrales de retención final (Amachawadi y Nagaraja, 2016; Humer et al., 2018; Zhang y Krehbiel, 2022).

2.3 El Novillo Charoláis: Características Y Exigencias Nutricionales En Corral.

El ganado Charoláis, que proviene de la zona de Charolles Francia, es considerado como una de las líneas genéticas continentales o europeas más relevantes y solicitadas en los sistemas de engorde intensivo o corrales de finalización (feedlots) a escala mundial (McEvers et al., 2018; Thomas y Shike, 2020). Desde un enfoque morfológico y fisiológico esta raza se distingue por su gran tamaño, una hipertrofia muscular hereditaria moderada, un esqueleto fuerte y una tasa de acumulación de tejido adiposo subcutáneo que es más baja que las de las razas británicas o las líneas cebuanas (Mader et al., 2020; Sarturi et al., 2019).

La genética del novillo Charoláis le proporciona beneficios comerciales muy competitivos. por ejemplo, su ganancia de peso diaria promedio supera con frecuencia a los 1,5 a 1.8 kg/día, tiene una eficiencia de conversión alimentaria muy rentable y un rendimiento de canal alto, con un porcentaje elevado de carne magra vendible y un área del ojo de la costilla (*Longissimus dorsi*) excepcionalmente desarrollada (McEvers et al., 2018; Thomas y Shike, 2020). Sin embargo, para que un animal con tal capacidad de masa magra pueda manifestarse todos sus beneficios genéticos y alcanzar el nivel de marmoleo metabólicamente posible durante la fase final, es necesario rediseñar raciones alimenticias con una densidad energética muy concentrada (NASEM, 2016; Shike, 2019).

En los corrales comerciales de engorde, se logra cumplir con estas necesidades energéticas al proveer dietas formuladas con una relación concentrado: forraje que varía entre el 85:15 y 90:10 (Arias et al., 2019; Martins et al., 2019). Estas raciones basan su aporte calórico en la inclusión masiva de carbohidratos no estructurales que se fermentan fácilmente como almidón gelatinizado o expuesto a través de procesos de molienda fina, extraídos de granos de cereales, es la base del aporte calórico de estas raciones (Martins et al., 2019; Shike, 2019).

Aunque este sustrato amiláceo fomenta la hipertrofia muscular al optimizar la producción de ácido graso propiónico y estimular la síntesis de insulina, al mismo tiempo genera una tensión fisiológica crítica en el tracto gastrointestinal superior (Arias et al., 2019; Snyder Y Krehbiel, 2022). El tamaño de partícula físicamente eficaz de la dieta disminuye al ingerir estas raciones, lo que anula los estímulos mecánicos necesarios para que los mecanorreceptores de la pared retículo- ruminal inicien el reflejo de la masticación y los ciclos de la rumia (Beauchemin, 2018; Mader et al., 2020).

El efecto inmediato de esta reducción en la duración total de la rumiación es una disminución significativa en la síntesis y la secreción ininterrumpida de saliva endógena (Cavedo et al., 2020; Plaizier et al., 2018). Dado que la saliva bovina constituye una solución acuosa altamente alcalina abundante en iones de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y fosfato disódico (Na_2HPO_4), su deficiencia priva al rumen de su principal mecanismo de amortiguadores biológica contra el exceso de iones de hidrógeno (NASEM, 2016; Oetzel y Krause, 2017).

En consecuencia, el novillo Charoláis, seleccionado genéticamente por su rendimiento superior de carne y su consiguiente dependencia de dietas caracterizadas por una alta densidad energética, presenta una susceptibilidad metabólica notablemente mayor a soportar una acidosis ruminal subaguda (SARA) prolongada en comparación con otras razas (Arias et al., 2019; De Nardi et al., McEvers et al., 2018). Esta vulnerabilidad del ecosistema interno corrobora plenamente el imperativo de investigar y ejecutar estrategias de modulación química exógena mediante la incorporación de aditivos reguladores del pH (De Nardi et al., 2016; Millen et al., 2022).

2.4 Agentes Alcalinizantes Y Buffers En La Nutrición Animal.

La integración deliberada de aditivos químicos destinados a regular, modular o estabilizar el equilibrio ácido-base en el medio ruminal ha sido reconocida como una metodología crucial y estandarizada en la formulación de raciones de engorde (Golder y Lean, 2016; Lean et al., 2018).

No obstante, en el ámbito de la nutrición animal aplicada existe una ambigüedad conceptual generalizada entre los términos “Tampón” y “agente alcalinizante”, lo que pone de relieve la necesidad de diferenciar sus funcionalidades químicas dentro del líquido ruminal para comprender su eficacia biológica (Bach et al., 2020; Vieira y Millen, 2024).

Un tampón biológico se caracteriza precisamente como una solución conjugada que consiste en un ácido débil y su correspondiente base conjugada, con el objetivo principal de mitigar las fluctuaciones significativas en la concentración de iones de hidrógeno (H^+) dentro de un rango de pH confinado y específico, que viene dictado por su constante de disociación ácida o valor de pK_a (Golder y Lean, 2016; Matías et al., 2021).

Un ejemplo por excelencia de un amortiguador ruminal es el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), que posee un valor de pK_a cercano a los 6.2 a 6.3 (Golder y Lean, 2016; Samuelson et al., 2016).

Esto implica que el bicarbonato de sodio tiene su máxima capacidad estabilizadora cuando la digestibilidad en el rumen está en niveles ideales (aproximadamente entre 6.2 y 6.5); sin embargo, si el pH del rumen baja a valores críticos compatibles con SARA (menos de 5.6), la habilidad del buffer del bicarbonato de sodio se agota antes de tiempo, lo que hace perder su eficacia protectora (Bach et al., 2020; Lean et al., 2018; Samuelson et al., 2016).

En cambio, un agente alcalinizante es una sustancia inorgánica con propiedades puramente básicas y sin un área de amortiguación restringida por un pKa bajo. Su mecanismo de acción consiste en reaccionar directamente los protones libres de hidrógenos y aumentar el pH ruminal hasta que sea neutro o alcalino, independiente del valor de pH del líquido libre del rumen (Bach et al., 2020; Ribeiro/Silveira y Millen, 2023; Vieira y Millen, 2024).

Esta cualidad hace que los agentes alcalinizantes sean instrumentos terapéuticos mucho más poderosos y de mayor duración para disminuir la reducción para disminuir la reducción del pH provocada por las dietas hiperenergéticas en bovinos confinados (Matías et al., 2021; Ribeiro et al., 2023).

2.4.1 Propiedades Químicas Y Biológicas Del Óxido De Magnesio (MgO).

El óxido de magnesio (MgO), también llamado magnesia calcinada en términos comerciales, es un mineral inorgánico sólido y denso que tiene una estructura cristalina. En cuanto a la nutrición de rumiantes, se caracteriza por tener una capacidad teórica para enlazar y neutralizar protones mucho más alta por cada unidad de peso que el bicarbonato de sodio (Ahmed y Robinson, 2018; Lean et al., 2018).

Desde el punto de vista de la cinética química, cuando se consume MgO y este entra en el medio acuoso del líquido ruminal, pasa por un proceso sostenido y gradual de disociación que origina la emisión de cationes de magnesio (Mg^{2+}) y aniones hidróxido (OH^-), conforme a la ecuación fundamental: $MgO + H_2O \rightarrow Mg^{2+} + 2OH^-$ (Ahmed y Robinson, 2018; Neuhold et al., 2023).

Los grupos hidróxido (OH^-) generados en esta reacción se combinan de inmediato con los hidrogeniones (H^+) libres que se han reunidos en el rumen como resultado del proceso de fermentación descontrolada por las bacterias amilolíticas (Matías et al., 2021; Neuhold et al., 2023). La unión de OH^- con H^+ genera moléculas de agua neutra, (H_2O) lo que neutraliza la acidez libre y ocasiona un aumento directo, predecible y constante del pH en el líquido ruminal (Bach et al., 2020; Castillo-Lopez et al., 2021). El óxido de magnesio proporciona una potencia neutralizante prolongada, pues cada molécula disociada tiene dos grupos hidróxido, esta potencia actúa como un escudo químico constante durante todo el día (Ahmed y Robinson, 2018; Vyas y Beauchemin, 2017).

Según Lean et al. (2018) y Vyas y Beauchemin (2017), la estabilización del pH ruminal provocada por el MgO tiene un gran impacto en todo el sistema a nivel zootécnico. En primer lugar, el MgO mantiene la viabilidad enzimática de las poblaciones de bacterias fibrolíticas y celulolíticas al evitar sostenidamente que el pH descienda por debajo de 5.6. Estas dejan de crecer o mueren a causa de la lisis celular si hay un pequeño aumento en la acidez del rumen (Matías et al., 2021; Vyas y Beauchemin, 2017).

Del mismo modo, mantener estable el pH ruminal evita que se inflamen las uniones estrechas del epitelio y detiene la translocación de endotoxinas hacia la circulación portal (Castillo-Lopez et al., 2021; Wood y Wood, 2023). Además, el MgO regula la osmolaridad del fluido digestivo, lo que hace que la velocidad de paso o flujo de salida de la digesta hacia el omaso aumente (Ahmed y Robinson, 2018; Lean et al., 2018).

La tasa de pesaje más elevada motiva al animal a mantener el consumo alimenticio más uniforme, eliminando picos de ingesta compulsiva y mejorando el coeficiente total aparente de digestibilidad de la materia seca (Bach et al., 2020; Vyas y Beauchemin, 2017).

2.5 Métodos Para Evaluar La Digestión Y La Degradabilidad In Situ De Los Alimentos

La medición precisa de las tasas de degradación, la cinética de la fermentación y los coeficientes de biodisponibilidad de los nutrientes en las materias primas para piensos constituye un elemento fundamental en la formulación científica de las dietas para el ganado criado para la producción de carne vacuno en la gama final (Krizasan et al., 2016; Van Amburgh y Ross, 2019). Tradicionalmente, el campo de la ciencia animal ha establecido metodologías de evaluación que pueden clasificarse en tres grupos principales: modelos in vivo, modelos in vitro y modelos in situ (Giallongo et al., 2017; Gonzalo y Guedes, 2022).

Si bien las evaluaciones in vivo reflejan la respuesta biológica integral del organismo, su ejecución técnica se ve significativamente limitada por los elevados gastos económicos. los amplios requisitos temporales, las cargas logísticas que recaen sobre los especímenes y el desafío de aislar los fenómenos microbiológicos específicos que se manifiestan únicamente dentro de la cámara ruminal (Krizasan et al., 2026; Oh J. et al., 2019).

Por el contrario, las metodologías in vitro convencionales tienden a subestimar las tasas de digestión como resultado de la acumulación de productos finales metabólicos dentro de los vasos de incubación, lo que conduce a una saturación media y, en consecuencia, la inhibe la proliferación de la bacteria debido a la ausencia de un mecanismo de absorción o paso continuo (Gonzalo y Guedes, 2022; Pashaei et al., 2020).

En este marco metodológico, la técnica de evaluación in situ, comúnmente conocida como técnica de bolsas de nylon, formulada originalmente por Ørskov y McDonald sigue siendo reconocida de manera inequívoca como método estándar mundial para dilucidar la dinámica de la degradación ruminal relacionada con las fracciones de materia seca y proteína de los piensos (Giallongo et al., 2017; Tagliapietra et al., 2019).

Esta metodología implica la suspensión temporal de muestras homogeneizadas y pesadas y pesadas del sustrato del alimento dentro de las bolsas construidas con material sintético poroso, que posteriormente se insertan a través de una cánula permanente en el saco ventral del rumen de los sujetos fistulados (Pashaei et al., 2020; Schiavon et al., 2021).

El principal mérito biológico y metodológico de este procedimiento experimental se atribuye fundamentalmente a la exposición directa del sustrato experimental al auténtico entorno fisiológico del organismo huésped (Giallongo et al., 2017; Stefenoni y Hristov, 2023).

Esta afección genera una interacción dinámica entre los nutrientes y el consorcio microbiano autocrono, que abarca el intrincado conjunto, que abarca el intrincado conjunto de bacterias, protozoos y hongos anaeróbicos, al tiempo que aprovecha la temperatura corporal fisiológica, las acciones de mezcla peristáltica del pilar ruminal, la incesante absorción de ácidos grasos volátiles generados y las fluctuaciones homeostáticas genuinas del pH ruminal (Krizasan et al., 2016; Stefenoni y Hristov, 2023; Tagliapietra et al., 2019).

2.5.1 Fundamentos Biofísicos Y Dinámicos De La Técnica De Las Bolsas De Nylon (Ørskov)

La validez analítica y la reproducibilidad de la metodología de las bolsas de nylon dependen de la meticulosa estandarización de los parámetros biofísicos esenciales, que abarcan la porosidad del material de la bolsa, la correlación entre el peso de la muestra y el área de superficie, el método de inserción intraluminal y los protocolos de lavado y deshidratación posteriores a la extracción (Giallongo et al., 2017; Oh et al., 2019; Schiavon et al., 2021).

La dimensión del tamaño de los poros en el tejido de nylon sirve como parámetro crítico para la regulación del intercambio biológico (Krizasan et al., 2016; Stefenoni y Hristov, 2023). La literatura científica internacional afirma consistentemente que el diámetro ideal de los poros debe mantenerse en precisión dentro de los 40 a 50 micrones (μm) (Krizasan et al., 2016; Oh et al., 2019).

Este diámetro específico refleja el equilibrio físico meticuloso: es lo suficientemente grande como para facilitar la entrada de bacterias ruminales, zoosporas fúngicas y enzimas hidrolíticas libres en la bolsa, promoviendo así la colonización óptima del sustrato alimentario (Giallongo et al., 2017; Stefenoni y Hristov, 2023).

Al mismo tiempo, el tamaño de los poros es lo suficientemente estrecho como para obstruir el escape prematuro de partículas de alimentos insolubles y no degradadas al líquido ruminal externo, lo que provocaría una inflación errónea del coeficiente de digestibilidad (Giallongo et al., 2017; Pashaei et al., 2020).

Las pautas de procedimiento establecidas estipulan la incubación de una serie secuencial de réplicas, que se extraen de manera sistémica de acuerdo con intervalos temporales predeterminados (comúnmente a las 0, 4, 8, 12, 24, 48 y 72 horas) (Gonzalo y Guedes, 2022; Tagliapietra et al., 2019). Las bolsas designadas para el tiempo cero horas (0 h) representa la fracción de la dieta que se disuelve inmediatamente y se elimina; estas bolsas no entran en el rumen y se someten directamente al proceso de lavado en frío, lo que facilita la distinción analítica entre los componentes que se disuelven instantáneamente y los que requieren una colonización bacteriana obligatoria para su degradación (Krizasan et al., 2016; Schiavon et al., 2021).

Durante los intervalos de incubación ruminal, las bolsas se extraen del saco ventral y se someten rápidamente a un proceso de inmersión en agua helada o se enjuagan continuamente con agua corriente (Giallongo et al., 2017; Oh et al., 2019).

Esta metodología cumple dos funciones biológicas principales: detener rápidamente las actividades metabólicas y fermentativas de las enzimas microbianas asociadas al sustrato a eliminar mecánicamente la biomasa bacteriana contaminante que se ha adherido a los residuos de las muestras (Giallongo et al., 2017; Tagliapietra et al., 2019).

Posteriormente las bolsas se someten a un horno de aire forzado a temperaturas meticulosamente reguladas (que suelen oscilar entre 55 a 65 °C) durante un periodo mínimo de 48 horas para erradicar todo el contenido de humedad y establecer el peso seco residual (Krizasan et al., 2016; Tagliapietra et al., 2019). Al sacarlos del horno, se colocan en un desecador hermético que contiene sales higroscópicas para asegurar la estabilización antes de pesarlos con una balanza analítica de alta precisión (Oh et al., 2019; Tagliapietra et al., 2019).

En última instancia, la proporción de desaparición de materia seca (DMS) o digestibilidad in situ para cada intervalo temporal se determina mediante la aplicación de la ecuación matemática diferencial del balance de masas: $\% \text{ DMS} = (\text{Peso Inicial Seco} - \text{Peso Residual Seco}) / \text{Peso Inicial Seco} \times 100$ (Giallongo et al., 2017; Pashaei et al., 2020). La adquisición de estos perfiles de degradabilidad cinética permite la calibración de modelos matemáticos no lineales para determinar la degradabilidad efectiva del alimento (Gonzalo y Guedes, 2022; Tagliapietra et al., 2019).

En el marco de las investigaciones que evalúan los aditivos minerales, el método de la bolsa de nylon sirve como un instrumento analítico esencial, ya que facilita la demostración de cómo la inclusión de compuestos alcalinizantes como el óxido de magnesio (MgO) influye directamente en la velocidad y el porcentaje final de digestión de la materia seca al mantener un entorno ruminal óptimo y reducir la prevalencia del SARA (Zebeli y Humer, 2017; Pashaei et al., 2020; Tagliapietra et al., 2019).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un estudio experimental para dilucidar la eficacia del óxido de magnesio como tratamiento complementario para la acidosis ruminal en novillos fistulados, además de mejorar la digestibilidad ruminal en bovinos Charoláis en condiciones de corral. Para realizar el experimento se necesitaron los siguientes materiales:

- Novillos fistulados
- Cánula ruminal neumática permanente
- Potenciómetro (pH-metro)
- Bolsas de nylon
- Aros de metal
- Ligas
- Ancla de contra peso
- Estufa de aire caliente
- Balanza analítica
- Recipientes de aluminio
- Desecador
- pinzas de metal
- Mufla
- Crisoles
- Óxido de magnesio

3.1 Generalidades

La investigación se estructuró meticulosamente con el objetivo de dilucidar la eficacia del óxido de magnesio (MgO) como agente corrector de los niveles de pH ruminal en escenarios caracterizados por la acidosis resultante de dietas compuestas predominantemente por concentrados. Además, se buscó evaluar el impacto sobre la estabilidad de la microbiota ruminal y el consecuente aprovechamiento metabólico de los nutrientes de la ración. El protocolo experimental se implementó utilizando novillos de engorde fistulados y se basó en la metodología analítica *in situ* de Ørskov. La fase analítica preliminar consistió en la confección y el acondicionamiento de un total de un total de 36 bolsas de nylon, procedimiento realizado con 24 horas de anticipación en el laboratorio de bromatología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

3.2 Localización

El proyecto se realizó en las instalaciones de CBR centro de reproducción de bovinos en la universidad autónoma agraria Antonio narro, ubicada en Torreón Coahuila, en el periférico Raul López Sánchez sin número 27054, con coordenadas de: 25.556785, -103.372708

3.3 Manejo

En este estudio se utilizaron novillos charoláis equipados con una fistula o una cánula ruminal permanente compuesta de caucho flexible. Los sujetos fueron alojados en corrales individuales, equipados con comedores y bebederos. El protocolo experimental implicó la evaluación de dos tratamientos dietéticos distintos: una dieta de control caracterizada por una alta concentración de granos fermentables desprovistos de aditivos (Mezcla 5 – CHAPO) y una dieta experimental correspondiente aumentada uniformemente con óxido de magnesio (MgO) que sirve como agente alcalinizante (Mezcla 6 – CAIN).

3.4 Preparación

Con 24 horas de anticipación al inicio de la fase de incubación intraluminal, se procedió a la preparación y acondicionamiento de los materiales en el laboratorio de bromatología. Se utilizaron un total de 36 bolsas de tejido de nylon comercial con una porosidad controlada de entre 40 y 50 micras (μm) y dimensiones de 5 x 10 cm. Las bolsas fueron previamente rotuladas con marcador indeleble, introducidas en una estufa de circulación forzada para eliminar la humedad ambiental residual y pesadas en una balanza analítica de alta precisión para determinar el peso de la bolsa vacía. Posteriormente, se introdujeron las muestras secas y homogéneas del sustrato alimenticio correspondiente en el interior de cada replica, sellándose herméticamente mediante logas de alta resistencia y aros metálicos de anclaje.

3.5 Incubación Ruminal Y Remoción Cronológica

Las bolsas de nylon se fijaron fijamente a una cadena de sujeción provista de un contrapeso inerte para asegurar su inmersión constante dentro del saco ventral del rumen a través de la cánula, evitando su flotación en el estrato gaseoso. Se programó una escala cronológica de remoción por duplicado a las horas 0,4,8,12,24 y 48 horas post-ingesta. Las réplicas asignadas a las 0 horas (0 h) no se introdujeron en el animal y se utilizaron exclusivamente para cuantificar la fracción inmediatamente soluble. Al cumplirse estrictamente cada ventana de tiempo, las bolsas correspondientes fueron extraídas del interior del rumen empleando pinzas metálicas de sujeción.

3.6 Procesamiento Analítico

Inmediatamente después de su extracción, las bolsas fueron limpiadas con agua corriente, para detener la forma instantánea la actividad fermentativa y celular de las enzimas microbianas. Posteriormente se trasladaron al área de lavado del laboratorio, donde se sometieron a un flujo continuo de agua corriente fría hasta que el agua de salida se observó completamente traslúcida, eliminando la biomasa contaminante y los residuos del fluido ruminal.

Las bolsas limpias se deshidrataron en una estufa de aire forzado a 60 °C durante un periodo mínimo de 48 horas continuas hasta alcanzar un peso constante. Tras el secado, las muestras se trasladaron al desecador hermético para su enfriamiento. Finalmente, se registró el peso seco residual en una balanza analítica. El porcentaje de desaparición de la materia seca (DMS) o digestibilidad in situ se determinó por diferencia matemática de masa mediante la siguiente formula: $\% \text{ DMS} = (\text{Peso Inicial Seco} - \text{Peso Residual Seco}) / \text{Peso Inicial Seco} \times 100$

3.7 Monitoreo Del Ph

De forma paralela a la remoción de las bolsas de nylon, se realizó el muestreo cronológico del fluido ruminal en los mismos intervalos de tiempo (0,4,8,12,24 y 48 horas post- alimentación). A través de la cánula se extrajeron aproximadamente 50 mL de líquido ruminal intermedio empleando un muestreador filtrante. La lectura cinemática del pH se efectuó de manera inmediata empleando un potenciómetro digital portátil, previamente calibrado con soluciones amortiguadoras estándar (Buffers de referencia) a pH 4.0 y 7.0.

4. RESULTADOS

4.1 Monitoreo Del pH Ruminal

Los valores obtenidos del monitoreo cronológico del pH del fluido ruminal para ambos tratamientos se consolidan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Monitoreo del pH ruminal de novillos charoláis fistulados (Chapo y Cain).

Hora de muestreo	Mezcla 5 Control	Mezcla 6 Con MgO	Diferencia
0 h	6.2	6.7	+0.5
4 h	6.1	6.5	+0.4
8 h	6.0	6.7	+0.7
12 h	5.9	6.4	+0.5
24 h	6.4	6.9	+0.5
48 h	6.4	7.3	+0.9

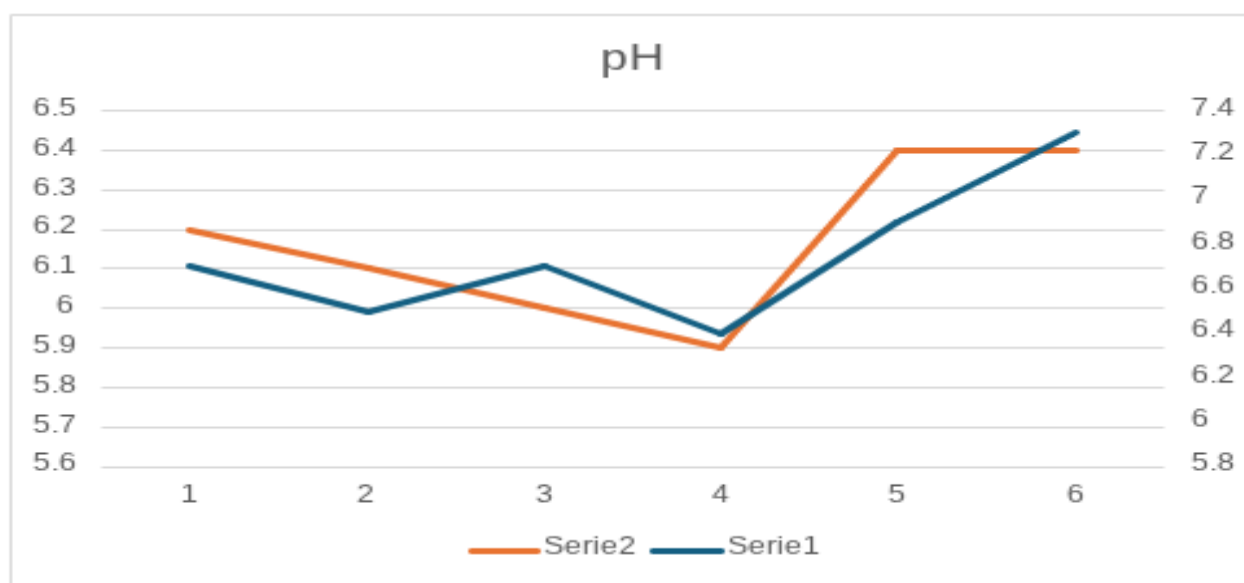


Figura 1. Comparativa del comportamiento del pH con y sin suplementación del MgO

El comportamiento del pH evidencio una mayor estabilidad en el animal suplementado con oxido de magnesio (CAIN). En el tratamiento control (CHAPO), se registró un descenso gradual del pH a partir de la hora cero (6.2), alcanzando su punto de mayor

acidez a las 12 horas post- ingesta con un valor de 5.9. En contraste, el novillo con aditivo alcalinizante (CAIN) exhibió valores consistentemente más altos en todos los puntos de muestreo, manteniendo un pH de 6.7 a las 8 horas y finalizando la evaluación con un pH marcadamente alcalino de 7.3 a las 48 horas.

4.2 Coeficientes De Degradabilidad In Situ De La Materia Seca (DMS)

Los porcentajes promedios de desaparición de la materia seca evaluados mediante la técnica de las bolsas de nylon se detallan en la siguiente tabla.

Cuadro 2. Porcentajes de desaparición de la materia seca (DMS) in situ a través del tiempo.

Hora de incubación	Mezcla 5 (Control)	Mezcla 6 (MgO)
0 h	22.85 %	44.44 %
4 h	42.18 %	48.19 %
8 h	56.49 %	48.49 %
12 h	64.09 %	52.31 %
24 h	58.96 %	63.22 %
48 h	77.15 %	74.96 %

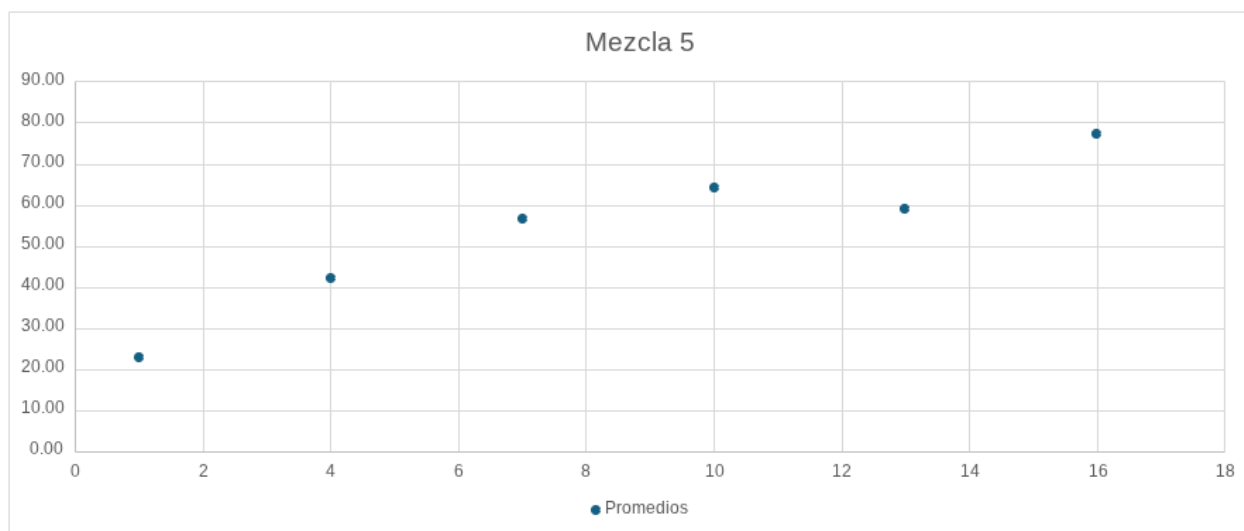


Figura 2. Comportamiento de digestibilidad en mezcla sin suplementación de MgO

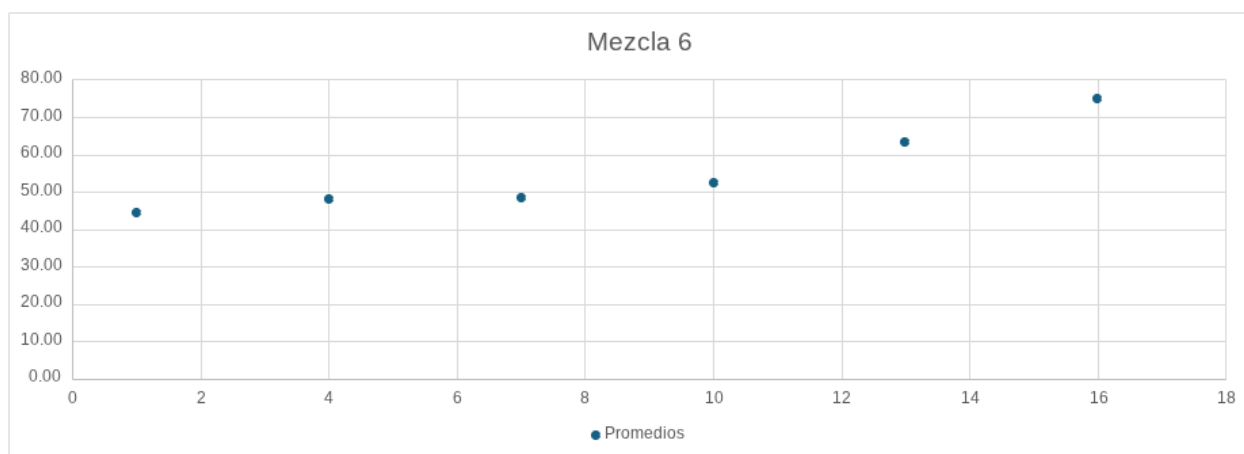


Figura 3. Comportamiento de digestibilidad en mezcla con MgO.

En el punto de tiempo inicial de 0 horas, la proporción de pérdida atribuible al lavado (fracción soluble) se elevó significativamente en la Mezcla 6 (44,44%) en comparación con la Mezcla 5 (22,85%). Tras una incubación intraluminal de 4 horas, el fenómeno de degradación microbiana mostró una progresión constante en ambos tratamientos experimentales. Al concluir el período experimental de 48 horas, se observó que la degradabilidad efectiva global de la materia seca alcanzó coeficientes notables en ambos grupos experimentales, con un porcentaje registrado del 77,15% del DMS en el tratamiento de control y del 74,96% en el tratamiento con óxido de magnesio.

5. DISCUSIÓN

Mantener un pH ruminal óptimo es crucial para prevenir los trastornos metabólicos en el ganado criado en entornos agrícolas (Arias et al., 2019; Penner et al., 2024). Los hallazgos de este estudio indican que la adición de óxido de magnesio (MgO) a la Mezcla 6 funcionó eficazmente como un agente alcalinizante externo, impidiendo que el pH cayera a niveles de riesgo sistémico, a diferencia de la Mezcla 5 (Control), que se desplomó hasta un nivel de 5.9 doce horas después de la alimentación. Este efecto protector del (MgO) se alinea con las observaciones realizadas por Ahmed y Robinson (2018) y Bach et al. (2020), quienes señalan que la disociación molecular de la magnesia calcinada libera iones hidróxido (OH^-), que neutralizan por completo los protones de hidrógeno libres (H^+) que se acumulan en el fluido debido a la fermentación de los almidones.

En relación con la pérdida de materia seca (DMS), los elevados coeficientes de digestibilidad registrados después de 48 horas (77,15% para el grupo de control y 74,96% para el tratamiento con MgO) afirman que el método de bolsas de nylon in situ de Ørskov se ejecutó en condiciones de estandarización biofísica adecuadas en el Laboratorio de Bromatología (Giallongo et al., 2017; Oh et al., 2019). El aumento de la pérdida de peso por lavado a las 0 horas observado en la Mezcla 6 (44,44%) indica una solubilidad inicial significativa de los elementos minerales y los carbohidratos no estructurales presentes en ese alimento (Krizasan et al., 2016).

Si bien el tratamiento de control mostró un porcentaje más alto de DMS final después de 48 horas (77,15%), la dieta mejorada con MgO mantuvo una tasa de degradación notablemente competitiva (74,96%). Desde un punto de vista biológico, esto indica que el aumento del pH ruminal provocado por el agente alcalinizante (que llegó a 7,3 a las 48 h) no afectó negativamente a la actividad hidrolítica general de la comunidad microbiana (Matias et al., 2021; Vyas y Beauchemin, 2017). Estos hallazgos respaldan la aplicación del óxido de magnesio como un recurso nutricional confiable y estratégico para estabilizar el entorno químico del rumen en los bueyes charoláis que siguen dietas ricas en energía, sin poner en peligro la asimilación general de los nutrientes de la dieta (Lean et al., 2018; Ribeiro et al., 2023).

6. CONCLUSIONES

- La adición de óxido de magnesio (MgO) a la mezcla dietética (Mezcla 6) mostró una eficacia biológica significativa como agente alcalinizante externo, preservando la estabilidad del pH ruminal y evitando una disminución drástica de la acidez en los terneros de Charoláis en comparación con la dieta de control.
- El análisis cinético del pH reveló que los terneros que seguían la dieta de control (Mix 5 - CHAPO) mostraron una tendencia hacia la acidificación ruminal, alcanzando su punto máximo 12 horas después del consumo con un pH de 5,9. Por el contrario, el ternero suplementado con MgO (Mix 6 - CAIN) mantuvo un pH ideal de 6,7 a las 8 horas y concluyó la evaluación dentro de un rango seguro de 7,3 a las 48 horas.
- Al utilizar el método de bolsas de nailon in situ de Ørskov, se demostró que ambas formulaciones dietéticas alcanzaban niveles notables de degradabilidad de la materia seca (DMS) después de 48 horas de incubación, alcanzando un 77,15% en la mezcla 5 y un 74,96% en la mezcla 6.
- La pérdida significativa por lavado observada a las 0 horas después del tratamiento con óxido de magnesio (44,44%) en comparación con el control (22,85%) indica una alta solubilidad inicial de los componentes de la Mezcla 6, lo que mejora la rápida disponibilidad del sustrato en el entorno ruminal.

- Se concluye que el óxido de magnesio sirve como una opción nutricional práctica y segura para el acabado del ganado en un corral de engorde, ya que reduce eficazmente la acidez intraluminal sin afectar o disminuir adversamente los coeficientes de digestibilidad efectiva de la materia seca del alimento.

7. LITERATURA CITADA

1. Ahmed, B. M., & Robinson, P. H. (2018). Impact of different magnesium sources on mineral solubility and volatile fatty acid profiles in beef cattle fed high-grain diets. *Animal Feed Science and Technology*, 241, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.015>
2. AlZahal, O., Dionissopoulos, L., & McBride, B. W. (2016). Assessment of subacute ruminal acidosis (SARA) biomarkers in intensive beef production systems. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 100(4), 631-645. <https://doi.org/10.1111/jpn.12372>
3. Amachawadi, R. G., & Nagaraja, T. G. (2016). Liver abscesses in feedlot cattle: A review of etiology, pathogenesis, and control. *Journal of Animal Science*, 94(4), 1620-1632. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0142>
4. Arias, R. A., Velásquez, A., & Mader, T. L. (2019). Nutritional strategies to mitigate heat stress and metabolic disorders in feedlot cattle: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(2), 302-314. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000200302>
5. Bach, A., Guasch, I., & Elcoso, G. (2020). Effects of buffering and alkalizing agents on rumen fermentation, diet digestibility, and production performance of beef cattle fed high-concentrate diets. *Journal of Animal Science*, 98(4), skaa088. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa088>
6. Beauchemin, K. A. (2018). Invited review: Current perspectives on physical effectiveness of diets for beef and dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 101(10), 8611-8634. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14511>
7. Castillo-Lopez, E., Domínguez-Ordóñez, J. A., & Penner, G. B. (2021). Evaluation of ruminal dosing of magnesium oxide on epithelial integrity and volatile fatty acid absorption in beef steers. *Veterinary and Animal Science*, 12, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100178>
8. Cavedo, F., Millen, D. D., & Martins, C. L. (2020). Assessment of different fiber sources and particle size on chewing activity and rumen health of finishing Nellore cattle. *Animal Science Journal*, 91(1), e13354. <https://doi.org/10.1111/asj.13354>

9. Chang, G., & Shen, X. (2021). Subacute ruminal acidosis modulates epithelial tight junction expression and lipopolysaccharide translocating pathways in ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 645122. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.645122>
10. Coon, E. M., Krehbiel, C. R., & Zhang, S. (2019). Pathophysiology and management of subacute ruminal acidosis in beef cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 45-58. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0352-x>
11. De Nardi, R., Marchesini, G., & Segato, S. (2016). Effects of grain processing and buffer supplementation on reticulorumen pH dynamics in Charolais bulls. *Animal*, 10(6), 912-921. <https://doi.org/10.1017/S175173111500275X>
12. Enemark, J. M., & Oetzel, G. R. (2020). Diagnostic strategies and health management protocols for subacute ruminal acidosis in intensive beef feedlots. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 36(2), 345-361. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.03.003>
13. Giallongo, F., Harper, M. T., Oh, J., Lopes, J. C., Lapierre, H., Crockett, B., & Hristov, A. N. (2017). Evaluation of the *in situ* nylon bag technique for determining ruminal crude protein and amino acid degradability of different feedstuffs. *Journal of Dairy Science*, 100(11), 8841-8854. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12821>
14. Golder, H. M., & Lean, I. J. (2016). A meta-analysis of the effects of dietary buffers and alkalizers on rumen fermentation characteristics in cattle. *Journal of Dairy Science*, 99(11), 8790-8805. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11234>
15. Gonzalo, E., & Guedes, C. M. (2022). Kinetic models for *in situ* dry matter and neutral detergent fiber degradation in beef cattle: A methodological review. *Journal of Animal Feed Sciences*, 31(2), 95-108. <https://doi.org/10.22358/jafs/147811/2022>
16. Humer, E., Ghareeb, K., & Zebeli, Q. (2018). Clinical manifestations, biomarkers, and mitigation strategies of subacute ruminal acidosis in feedlot cattle. *Journal of*

- Animal Science and Technology*, 60(1), 12-28. <https://doi.org/10.1186/s40781-018-0171-8>
17. Krizasan, F., Nyholm, L., & Udén, P. (2016). Evaluation of methodological factors affecting the *in situ* ruminal degradation of dry matter and neutral detergent fiber in beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.06.012>
 18. Lean, I. J., Golder, H. M., & Block, E. (2018). Effects of sodium bicarbonate and magnesium oxide on rumen fermentation and milk fat production: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 3001-3015. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13511>
 19. Li, S., & Khafipour, E. (2019). Rumen microbiome dynamics and epithelial transcriptomic responses during subacute ruminal acidosis challenges in beef bulls. *BMC Genomics*, 20(1), 415-430. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5781-x>
 20. Mader, T. L., Johnson, L. J., & Ross, J. W. (2020). Evaluation of growth models, carcass yields, and metabolic stability in continental versus British steers finished under intensive husbandry. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104(5), 1210-1224. <https://doi.org/10.1111/jpn.13390>
 21. Martins, C. L., Millen, D. D., & Arrigoni, M. D. (2019). Survey of nutritional recommendations and management practices used by feedlot nutrition consultants in Brazil. *Journal of Animal Science*, 97(4), 1863-1875. <https://doi.org/10.1093/jas/skz052>
 22. Matias, J. M., Santos, J. F., & Millen, D. D. (2021). Evaluation of different alkalizing and buffering complexes on rumen health, starch digestion, and growth performance of feedlot Nellore cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114881. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114881>
 23. McCann, J. C., Elolimy, A. A., & Loores, J. J. (2016). Rumen microbiome, heritability, and phenotypes in ruminants. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 7(1), 31-43. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0091-x>
 24. McEvers, T. J., Hutcheson, J. P., & Lawrence, T. E. (2018). Evaluation of growth performance, carcass characteristics, and muscularity of Charolais- versus Angus-

- sired steers finished in intensive feeding systems. *Professional Animal Scientist*, 34(3), 245-254. <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01704>
25. Millen, D. D., Arrigoni, M. D., & Pacheco, R. D. (2022). Feedlot management practices and metabolic disorders in South American beef production: An updated outlook. *Animal Production Science*, 62(4), 311-325. <https://doi.org/10.1071/AN21302>
 26. Mizrahi, I., Wallace, R. J., & Morais, S. (2021). The rumen microbiome: Balancing productivity and environmental impact. *Nature Reviews Microbiology*, 19(9), 551-566. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00543-6>
 27. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM]. (2016). *Nutrient Requirements of Beef Cattle* (8th rev. ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19014>
 28. Neuhold, K. L., Wagner, J. J., & Engle, T. E. (2023). Effects of trace mineral and magnesium supplementation source on *in situ* dry matter digestion in feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 101, skad114. <https://doi.org/10.1093/jas/skad114>
 29. Oetzel, G. R., & Krause, K. M. (2017). Understanding subacute ruminal acidosis in feedlot cattle: Pathophysiology and prevention through chemical modulation. *The Veterinary Journal*, 221, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.01.018>
 30. Oh, J., Wall, E. H., & Hristov, A. N. (2019). Methodological considerations for using the *in situ* nylon bag technique in modern ruminant nutrition laboratories. *Journal of Animal Science and Technology*, 61(3), 145-159. <https://doi.org/10.5187/jast.2019.61.3.145>
 31. Owens, F. N., Qi, S., & Hicks, R. B. (2020). Feedlot cattle ailments: Associated causes, metabolic pathways, and nutritional interventions. *Journal of Animal Science*, 98(9), skaa256. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa256>
 32. Pashaei, S., Ghoorchi, T., & Khanahmadi, A. (2020). Kinetics of *in situ* dry matter and fiber degradation of high-concentrate rations under different buffering regimes in fistulated steers. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104(3), 789-801. <https://doi.org/10.1111/jpn.13324>
 33. Penner, G. B., Beauchemin, K. A., & Mutsvangwa, T. (2024). An updated paradigm of subacute ruminal acidosis: Etiology, epithelial barrier function, and systemic

- inflammation. *Animal Feed Science and Technology*, 307, 115842. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115842>
34. Plaizier, J. C., Daneshmesgaran, M., & Khafipour, E. (2018). Subacute ruminal acidosis (SARA) in ruminant animals: Update on physiological causes, biomarkers, and mitigation strategies. *The Veterinary Journal*, 233, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.12.012>
 35. Ramos, B. M., & Owens, F. N. (2021). Grain processing methods for beef cattle: Starch availability, ruminal fermentation rates, and metabolic risks. *Animal Feed Science and Technology*, 278, 114995. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114995>
 36. Ribeiro, L. P., Silveira, M. F., & Millen, D. D. (2023). Effects of alkalizing complexes containing magnesium oxide on ruminal parameters and total tract digestibility of Nellore steers. *Journal of Animal Science*, 101(Suppl. 2), 241-242. <https://doi.org/10.1093/jas/skad281>
 37. Samuelson, S., Hubbert, M. E., & Galvayan, M. L. (2016). Nutritional recommendations of consultants for feedlot cattle in the United States: A 2015 survey. *Journal of Animal Science*, 94(6), 2648-2663. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0428>
 38. Sarturi, J. O., Galvayan, M. L., & Brooks, J. C. (2019). Impact of continental genetics on growth curves, muscularity, and ruminal environment efficiency in feedlots. *Beef Cattle Research Report*, 38, 45-56. <https://doi.org/10.2567/bcrr.2019.04>
 39. Schiavon, S., Cattani, M., & Bailoni, L. (2021). Factors affecting the reproducibility of the *in situ* nylon bag technique across multiple fistulated animals. *Animal Science Papers and Reports*, 39(2), 115-128.
 40. Shike, D. W. (2019). Beef cattle finalization systems: Nutrient requirements and metabolic pathologies associated with high-grain feeding. *Animal Science Reviews*, 42(1), 78-95. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914012>
 41. Snyder, K. J., & Krehbiel, C. R. (2022). Gastrointestinal development and epithelial transport mechanics in beef cattle fed high-grain finishing diets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1), 84-99. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00732-5>

42. Stefenoni, H. A., & Hristov, A. N. (2023). Kinetic dynamics of *in situ* disappearance parameters using modern nylon fabrics in fistulated cattle. *Translational Animal Science*, 7(1), txad014. <https://doi.org/10.1093/tas/txad014>
43. Tagliapietra, F., Cattani, M., Bailoni, L., & Schiavon, S. (2019). Review: Critical factors affecting the accuracy and precision of the *in situ* nylon bag technique for ruminant feed evaluation. *Italian Journal of Animal Science*, 18(1), 512-527. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1624535>
44. Thomas, M. G., & Shike, D. W. (2020). Frame size, muscling selection, and nutrient partition in terminal continental crossbred steers under intensive systems. *Journal of Animal Science*, 98(5), skaa102. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa102>
45. Valenzuela, G. A., & Arias, R. A. (2021). Ruminal pH dynamics and continuous monitoring systems in beef cattle: Technical challenges and nutritional outputs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106014. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106014>
46. Van Amburgh, M. E., & Ross, J. W. (2019). Updating international models for evaluation of feedstuffs and rumen fermentation kinetics. *Animal Production Science*, 59(11), 1985-1997. <https://doi.org/10.1071/AN19221>
47. Vieira, M. F., & Millen, D. D. (2024). Mitigation strategies for subacute ruminal acidosis in high-grain systems: A definitive guide on buffers and neutralizing minerals. *Animal Feed Science and Technology*, 309, 115910. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.115910>
48. Vyas, D., & Beauchemin, K. A. (2017). Effects of dietary alkalizers on rumen pH, total tract nutrient digestibility, and methane emissions in beef steers. *Journal of Animal Science*, 95(8), 3612-3624. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1512>
49. Wang, Y., & McAllister, T. A. (2020). Rumen microbiome structure and functional shift in response to grain-induced subacute ruminal acidosis challenges in beef cattle. *Microbiome*, 8(1), 54-72. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00823-y>
50. Wood, K. M., & Penner, G. B. (2023). Gastrointestinal barrier function in ruminants: Impact of diet transition and metabolic stress on tight junctions. *Animal Frontiers*, 13(2), 34-42. <https://doi.org/10.1093/af/vfac091>

51. Zebeli, Q., & Humer, E. (2017). Macromineral nutrition and interaction with subacute ruminal acidosis prevention in feedlot cattle: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 234, 118-132.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.09.014>
52. Zhang, S., & Krehbiel, C. R. (2022). Inflammation and immune pathways activated during subacute ruminal acidosis and endotoxin translocation in beef cattle. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 245, 110390.
<https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2022.110390>