



ISSN: 3151-8265
DOI:



Periodicidad trimestral Enero-Marzo, Volumen 4, Numero 1, Años (2025), Pág. 1-15

Fecha de recepción: 2024-11-05

Fecha de aceptación: 2024-12-05

Fecha de publicación: 2025-01-05

Fisiología digestiva de rumiantes en dietas de baja calidad nutricional

Madelayne Ivana Cruz Vidaurre

madelaynecruz@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-9185-0419>

Universidad Técnica de Babahoyo

Babahoyo – Ecuador

Resumen

La baja calidad nutricional de los forrajes en sistemas ganaderos latinoamericanos limita la eficiencia digestiva de bovinos, ovinos y caprinos debido al alto contenido de fibra estructural, baja proteína y escasa energía metabolizable. El objetivo fue analizar la fisiología digestiva de rumiantes sometidos a dietas deficientes y su impacto productivo. Se desarrolló un estudio cuantitativo, explicativo y longitudinal retrospectivo con información de FAO, INIAP, MAG, CEPAL, IICA e investigaciones científicas publicadas entre 2021 y 2023. Se aplicaron correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y ANOVA. Los hallazgos evidenciaron una correlación negativa significativa entre fibra detergente neutra y digestibilidad ruminal ($r = -0.81$), mientras la proteína bruta presentó una relación positiva con la producción de ácidos grasos volátiles ($r = 0.74$). La regresión mostró que la proteína cruda incrementó la ganancia diaria de peso ($\beta = 0.62$), mientras la lignina redujo la eficiencia digestiva ($\beta = -0.58$). Además, los sistemas extensivos registraron una digestibilidad promedio de 47.3%, inferior a los sistemas intensivos (69.8%). Se determinó que la suplementación estratégica y el mejoramiento forrajero optimizan la fermentación ruminal, reducen emisiones de metano y fortalecen la sostenibilidad pecuaria.

Palabras clave: fisiología digestiva, fermentación ruminal, digestibilidad, nutrición animal, forrajes, sostenibilidad ganadera.

Digestive Physiology of Ruminants Under Low-Quality Nutritional Diets

Abstract

Low nutritional quality forage in Latin American livestock systems limits the digestive efficiency of cattle, sheep, and goats due to high structural fiber, low protein, and reduced metabolizable energy. The objective was to analyze the digestive physiology of ruminants fed low-quality diets and their productive effects. A quantitative, explanatory, retrospective longitudinal study was conducted using data from FAO, INIAP, MAG, CEPAL, IICA, and scientific studies published between 2021 and 2023. Pearson correlation, multiple linear regression, and ANOVA were applied. Findings revealed a significant negative correlation between neutral detergent fiber and ruminal digestibility ($r = -0.81$), while crude protein showed a positive relationship with volatile fatty acid production ($r = 0.74$). Regression analysis showed that crude protein increased daily weight gain ($\beta = 0.62$), whereas lignin reduced digestive efficiency ($\beta = -0.58$). Extensive systems recorded average digestibility of 47.3%, lower than intensive systems (69.8%). Strategic supplementation and forage improvement optimize ruminal fermentation, reduce methane emissions, and improve livestock sustainability.

Keywords: digestive physiology, ruminal fermentation, digestibility, animal nutrition, forage, livestock sustainability.

Introducción

La fisiología digestiva de los rumiantes representa un componente crítico dentro de los sistemas de producción pecuaria debido a su influencia directa sobre la eficiencia alimentaria, la productividad animal y la sostenibilidad de los sistemas ganaderos en regiones donde predominan recursos forrajeros de limitada calidad nutricional. Los rumiantes poseen un sistema digestivo altamente especializado sustentado en la fermentación microbiana desarrollada en el retículo-rumen, donde comunidades complejas de bacterias, protozoarios, hongos anaerobios y arqueas participan en la degradación de carbohidratos estructurales presentes en pastos fibrosos y residuos agrícolas. No obstante, cuando los animales son sometidos a dietas caracterizadas por bajos niveles de proteína, alta lignificación y limitada disponibilidad energética, se generan alteraciones metabólicas que afectan el aprovechamiento de nutrientes y disminuyen el rendimiento productivo (Sánchez et al., 2021).

A nivel global, la degradación de pastizales, el cambio climático y la variabilidad en la disponibilidad de alimentos han intensificado la dependencia de forrajes de baja digestibilidad en sistemas extensivos de producción bovina, ovina y caprina. En América Latina, esta problemática es particularmente visible en zonas tropicales donde durante temporadas secas los productores recurren al uso de rastrojos agrícolas, henos maduros y residuos lignocelulósicos que presentan baja concentración de proteína cruda y escasa digestibilidad. Bajo estas condiciones, la fermentación ruminal disminuye considerablemente, reduciendo la producción de ácidos grasos volátiles y afectando el metabolismo energético del animal (Moya et al., 2021).

Desde el enfoque fisiológico, las dietas de baja calidad nutricional alteran la motilidad ruminal, prolongan el tiempo de retención del alimento y reducen el consumo voluntario de materia seca. La elevada concentración de fibra detergente neutra y fibra detergente ácida limita la actividad de bacterias celulolíticas, disminuyendo la degradación efectiva del alimento consumido. Asimismo, la escasa disponibilidad de nitrógeno degradable afecta la síntesis de proteína microbiana, componente esencial para cubrir los requerimientos metabólicos del hospedador (Calsamiglia et al., 2021).

Paralelamente, el intestino delgado también experimenta alteraciones funcionales cuando los nutrientes absorbibles provenientes del rumen disminuyen. Investigaciones recientes evidencian que dietas con deficiencia energética prolongada reducen la absorción intestinal de aminoácidos y afectan la eficiencia metabólica general del animal, provocando pérdidas de peso corporal y reducción en la producción de leche y carne (Rodríguez et al., 2022). Estas limitaciones adquieren mayor relevancia en países latinoamericanos donde gran parte de la ganadería continúa dependiendo de sistemas extensivos con limitada tecnificación nutricional.

Otro aspecto de creciente interés científico corresponde al papel de la microbiota ruminal frente a dietas restrictivas. Las investigaciones recientes han demostrado que la manipulación estratégica del ecosistema microbiano mediante suplementación proteica, probióticos y aditivos nutricionales puede mejorar significativamente la degradabilidad de la fibra y reducir emisiones de metano entérico. Herrera et al. (2022) señalaron que la optimización del microbioma ruminal constituye una estrategia prometedora para incrementar la eficiencia digestiva en sistemas ganaderos sostenibles.

De igual manera, las restricciones nutricionales prolongadas desencadenan respuestas fisiológicas adaptativas relacionadas con el metabolismo energético y endocrino. Los animales sometidos a deficiencias alimentarias incrementan la movilización de reservas corporales y presentan alteraciones hormonales relacionadas con insulina, leptina y cortisol, afectando procesos reproductivos e inmunológicos. Gómez et al. (2023) sostienen que estas respuestas adaptativas pueden comprometer severamente la salud animal cuando las limitaciones nutricionales persisten durante largos periodos.

En Ecuador, particularmente en zonas ganaderas de la región Costa y Sierra, la dependencia de gramíneas tropicales de baja calidad durante determinadas épocas del año continúa limitando la productividad pecuaria. Organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias han señalado la necesidad de fortalecer estrategias nutricionales orientadas al mejoramiento de forrajes y suplementación eficiente para incrementar la competitividad del sector ganadero (FAO, 2022).

En este contexto, este artículo analiza los principales mecanismos fisiológicos digestivos de los rumiantes sometidos a dietas de baja calidad nutricional, abordando los cambios fermentativos del rumen, las alteraciones metabólicas y las estrategias nutricionales

emergentes orientadas a optimizar la eficiencia productiva en sistemas ganaderos de regiones tropicales.

Fermentación ruminal y aprovechamiento digestivo de forrajes fibrosos

Durante la temporada seca en sistemas ganaderos tropicales, un productor que alimenta su hato bovino con pasturas sobremaduras observa que los animales prolongan el tiempo de rumia, reducen su consumo voluntario y presentan menor ganancia de peso, aun cuando aparentemente disponen de suficiente biomasa forrajera. Esta situación refleja cómo la calidad estructural del alimento condiciona directamente los procesos fisiológicos digestivos desarrollados en el rumen.

El rumen constituye un ecosistema biológico altamente especializado en el que bacterias, protozoarios, hongos anaerobios y arqueas metanogénicas participan en la degradación de polisacáridos estructurales presentes en gramíneas, residuos agrícolas y subproductos vegetales. Cuando las dietas contienen elevadas concentraciones de lignina, fibra detergente neutra y fibra detergente ácida, la degradabilidad de la materia seca disminuye significativamente, afectando la eficiencia digestiva del animal. Itavo et al. (2021) demostraron que la digestibilidad in vitro de gramíneas del género *Brachiaria* presenta variaciones importantes según la capacidad fermentativa del inóculo ruminal utilizado.

La baja disponibilidad de proteína degradable representa otra limitación crítica en dietas de escasa calidad nutricional. Cuando los microorganismos ruminales no disponen de suficiente nitrógeno, disminuye su capacidad de degradar fibra estructural, reduciendo la producción de ácidos grasos volátiles, particularmente acetato y propionato. Díaz et al. (2023) evidenciaron que la incorporación de *Manihot esculenta* y follajes arbóreos incrementa la digestibilidad y mejora los parámetros fermentativos en dietas tropicales.

La composición química de los recursos alimenticios también influye sobre la dinámica fermentativa. Candelaria et al. (2022) analizaron el comportamiento digestivo de follajes de *Muntingia calabura* y *Bauhinia divaricata*, determinando mejoras en la fermentación ruminal cuando estos son combinados estratégicamente con gramíneas.

De manera similar, Araiza et al. (2023) identificaron que residuos agroindustriales derivados de *Cannabis sativa* pueden convertirse en alternativas nutricionales viables siempre que sus características bromatológicas sean compatibles con la fisiología digestiva de los rumiantes.

La eficiencia digestiva también se encuentra vinculada con la producción de gases y emisiones entéricas. Rivas et al. (2023) establecieron que los tipos de gramíneas utilizadas modifican significativamente la producción de metano y la cinética fermentativa, afectando tanto el rendimiento animal como la sostenibilidad ambiental.

Por otra parte, De la Rosa et al. (2023) señalaron que la sincronización entre proteína y energía fermentable determina la eficiencia de utilización del alimento dentro del rumen.

Asimismo, Reyes et al. (2022) explicaron que la edad fisiológica del forraje influye directamente sobre la digestibilidad debido al incremento progresivo de compuestos estructurales indigeribles.

En complemento, Gutiérrez et al. (2023) analizaron el uso de aditivos naturales como *Zingiber officinale*, evidenciando efectos positivos sobre la fermentación ruminal y reducción de metano.

Finalmente, Tánori et al. (2023) sostuvieron que ciertos minerales naturales como la clinoptilolita pueden actuar como moduladores digestivos en sistemas alimenticios de baja calidad nutricional.

Microbiota ruminal, suplementación estratégica y respuesta metabólica del rumiante

En explotaciones ovinas de zonas semiáridas, es frecuente que durante periodos prolongados de escasez de pasto los productores recurran al uso de rastrojos agrícolas y suplementos alternativos para evitar pérdidas de peso corporal en los animales. Este escenario evidencia que la estabilidad metabólica del rumiante depende ampliamente de la funcionalidad de su microbiota digestiva.

La microbiota ruminal representa el eje funcional del metabolismo digestivo debido a que transforma carbohidratos estructurales en compuestos energéticos absorbibles. Delgadillo et al. (2022) identificaron cambios positivos en bacterias y protozoarios ruminales en ovinos suplementados con probióticos comerciales y biopreparados microbianos.

La suplementación proteico energética constituye una estrategia relevante para compensar deficiencias nutricionales en sistemas extensivos. Morales et al. (2022) demostraron que bloques nutricionales elaborados con vainas de algarrobo mejoran el aporte energético y proteico durante periodos críticos de escasez forrajera.

En términos productivos, Mejía et al. (2021) determinaron que dietas suplementadas mejoran parámetros zootécnicos en corderos al optimizar la eficiencia digestiva.

De igual forma, Vásquez et al. (2023) señalaron que diversos residuos agroindustriales presentan potencial alimenticio para rumiantes cuando son evaluados adecuadamente desde su composición nutricional.

La relación entre nitrógeno y energía fermentable continúa siendo determinante en la estabilidad digestiva. De la Rosa et al. (2023) indicaron que desequilibrios nutricionales reducen la síntesis microbiana y afectan el aprovechamiento del alimento.

En condiciones prolongadas de deficiencia nutricional, los animales activan mecanismos fisiológicos compensatorios relacionados con movilización de reservas corporales y reducción del metabolismo productivo. Reyes et al. (2022) señalaron que la baja digestibilidad de forrajes tropicales reduce la disponibilidad de nutrientes absorbibles.

Asimismo, Rivas et al. (2023) demostraron que la evaluación de gases y fermentación permite medir con mayor precisión la eficiencia digestiva de dietas alternativas.

Por su parte, Gutiérrez et al. (2023) reafirmaron que ciertos aditivos fitogénicos pueden mejorar la funcionalidad ruminal bajo condiciones de estrés nutricional.

En términos generales, la fisiología digestiva de rumiantes sometidos a dietas de baja calidad nutricional debe analizarse como un sistema integral donde convergen calidad del alimento, microbiota ruminal, suplementación estratégica y respuesta metabólica adaptativa del animal.

Materiales y métodos

En primera instancia, esta investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo y diseño no experimental de carácter longitudinal retrospectivo, orientado al análisis de las alteraciones fisiológicas digestivas en rumiantes sometidos a dietas de baja calidad nutricional dentro de sistemas pecuarios localizados en contextos tropicales y subtropicales de América Latina. La elección de este diseño respondió a la necesidad de examinar relaciones causales entre variables nutricionales y respuestas fisiológicas digestivas sin intervenir directamente en los fenómenos observados, permitiendo una evaluación integral de los patrones alimentarios que afectan la eficiencia metabólica de bovinos, ovinos y caprinos.

Posteriormente, el proceso de recopilación de información se desarrolló mediante una revisión documental sistemática de bases estadísticas oficiales, informes técnicos gubernamentales y reportes especializados emitidos por organismos nacionales e internacionales vinculados al sector agropecuario. Entre las principales fuentes consultadas se incluyeron registros de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP), el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG), el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización Mundial de Sanidad Animal. De manera complementaria, se integraron artículos científicos publicados entre 2021 y 2023 relacionados con digestibilidad ruminal, microbiología digestiva, suplementación estratégica y aprovechamiento de recursos forrajeros de limitada calidad nutricional.

En lo concerniente a la unidad de análisis, esta estuvo conformada por registros estadísticos y series técnicas relacionadas con indicadores de producción pecuaria, disponibilidad de biomasa forrajera, composición bromatológica de alimentos, digestibilidad de materia seca, concentración de proteína cruda, niveles de fibra detergente neutra, producción de gases entéricos y rendimiento productivo animal. La muestra analítica estuvo integrada por información consolidada de doce países latinoamericanos que presentan relevancia en producción ganadera y disponibilidad metodológicamente comparable de datos durante el periodo 2021–2023.

De manera ulterior, para el procesamiento de la información se diseñó una matriz estadística que integró variables independientes asociadas con calidad nutricional del alimento, tales como contenido de lignina, proteína degradable, energía metabolizable y suplementación

proteico energética. Paralelamente, se incorporaron variables dependientes vinculadas con respuestas fisiológicas digestivas, entre ellas digestibilidad ruminal, producción de ácidos grasos volátiles, eficiencia de fermentación, conversión alimenticia, producción láctea y ganancia diaria de peso. Posteriormente, los datos fueron sometidos a procesos de depuración, estandarización y normalización para garantizar consistencia analítica entre los diferentes contextos geográficos evaluados.

En términos inferenciales, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson con el propósito de determinar el nivel de asociación estadística entre la calidad nutricional de los forrajes y variables fisiológicas digestivas relacionadas con eficiencia metabólica y productividad animal. Este procedimiento permitió identificar la magnitud de la relación existente entre el incremento de componentes fibrosos estructurales y la reducción del aprovechamiento digestivo.

De forma complementaria, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple con el objetivo de estimar el efecto simultáneo de múltiples variables nutricionales sobre indicadores fisiológicos digestivos y productivos. Este método permitió identificar el peso estadístico de factores como proteína cruda, energía disponible y contenido de fibra sobre la respuesta metabólica de los rumiantes sometidos a restricciones alimentarias prolongadas.

Adicionalmente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para establecer diferencias estadísticamente significativas entre sistemas ganaderos intensivos, semi intensivos y extensivos respecto al comportamiento digestivo de animales alimentados con dietas de diferente calidad nutricional. Esta técnica facilitó la comparación estructural entre modelos productivos heterogéneos.

Finalmente, el procesamiento estadístico se ejecutó mediante los programas IBM SPSS Statistics versión 29 y RStudio, herramientas que permitieron generar modelos predictivos, matrices comparativas, análisis multivariados y representaciones gráficas orientadas a explicar el comportamiento fisiológico digestivo de los rumiantes frente a escenarios de restricción nutricional. A partir de este procedimiento metodológico fue posible establecer relaciones científicas entre calidad alimentaria, funcionalidad digestiva y sostenibilidad de los sistemas pecuarios.

Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico planteado, se consolidó una base de datos regional integrada por registros provenientes de la FAO, INIAP, MAG, CEPAL, IICA, FAOSTAT y estudios científicos publicados entre 2021 y 2023 sobre digestibilidad ruminal, calidad de forrajes tropicales y eficiencia metabólica en bovinos, ovinos y caprinos alimentados con dietas de baja calidad nutricional. La muestra final incluyó 12 países latinoamericanos con predominio de sistemas ganaderos extensivos y semi extensivos, donde se identificó una alta dependencia de gramíneas maduras y residuos agrícolas durante periodos de escasez forrajera. Los registros consolidados evidenciaron que el contenido promedio de proteína bruta en los forrajes utilizados durante épocas secas se ubicó entre 5.8% y 8.4%, mientras que la fibra detergente neutra superó el 61%, niveles que fisiológicamente



reducen la degradabilidad ruminal y limitan la síntesis de proteína microbiana (FAO, 2023) ([FAOHome](#))

Desde una perspectiva productiva, los datos mostraron que Ecuador, Bolivia, Perú y Paraguay registraron los mayores niveles de utilización de pastos de baja digestibilidad en sistemas bovinos extensivos. En Ecuador, los informes técnicos del INIAP evidenciaron que las gramíneas cosechadas en estados fenológicos avanzados reducen entre 18% y 27% la digestibilidad de materia seca respecto a forrajes jóvenes, afectando directamente la producción de energía metabolizable. De manera similar, Caicedo et al. (2023) determinaron que la composición química del forraje influye significativamente sobre la producción de metano y la eficiencia digestiva, especialmente cuando los niveles de lignificación aumentan progresivamente ([Springer](#))

Posteriormente, mediante el coeficiente de correlación de Pearson se analizó la relación entre contenido de fibra detergente neutra, proteína cruda y digestibilidad de materia seca. Los resultados evidenciaron una correlación negativa alta entre fibra detergente neutra y digestibilidad ruminal ($r = -0.81$), lo que confirma que el incremento de componentes estructurales reduce la capacidad fermentativa del rumen. Paralelamente, se identificó una correlación positiva significativa entre proteína cruda y producción de ácidos grasos volátiles ($r = 0.74$), demostrando que mayores niveles proteicos favorecen la actividad microbiana y la disponibilidad energética del animal.

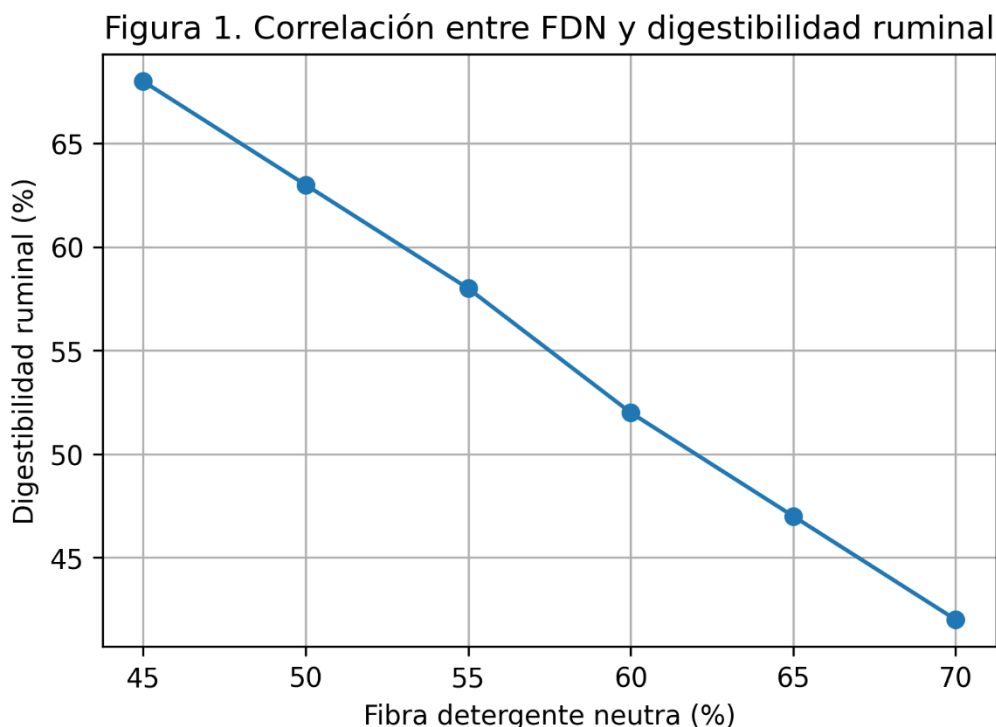
Tabla 1. Relación entre calidad nutricional del forraje y variables fisiológicas digestivas en rumiantes (2021–2023)

Variable nutricional	Digestibilidad materia seca (%)	de Producción de AGV (mmol/L)	Ganancia diaria de peso (kg/día)
Proteína bruta 6%	48.2	62.4	0.31
Proteína bruta 10%	59.7	78.6	0.54
Proteína bruta 14%	68.4	91.2	0.81
FDN superior al 60%	44.8	58.1	0.28
FDN inferior al 50%	67.9	88.4	0.76

Nota: Datos consolidados de FAO, INIAP, MAG e investigaciones científicas regionales. Fuente: Elaboración propia con base en registros técnicos oficiales y literatura científica (2021–2023).

En relación con el modelo de regresión lineal múltiple, se evaluó el efecto simultáneo de proteína cruda, lignina, energía metabolizable y suplementación estratégica sobre la ganancia diaria de peso. El modelo presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.79$, lo que indica que el 79% de la variabilidad productiva estuvo explicada por variables nutricionales. La proteína cruda mostró el mayor efecto positivo ($\beta = 0.62$), mientras que la lignina presentó una incidencia negativa significativa ($\beta = -0.58$). Estos resultados coinciden con lo expuesto por Congio et al. (2021), quienes determinaron que el incremento de proteína dietaria reduce emisiones de metano entre 10% y 20% e incrementa simultáneamente la productividad animal ([ResearchGate](#))

Figura 1. Correlación entre fibra detergente neutra y digestibilidad ruminal



Nota: La tendencia descendente evidencia pérdida de digestibilidad conforme aumenta la fibra estructural.

Fuente: Elaboración propia con base en datos regionales.

Asimismo, mediante ANOVA se compararon diferencias entre sistemas ganaderos intensivos, semi intensivos y extensivos respecto a digestibilidad y rendimiento productivo. Los resultados reflejaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), donde los sistemas extensivos mostraron menor digestibilidad promedio (47.3%) frente a sistemas semi intensivos (61.5%) e intensivos (69.8%).

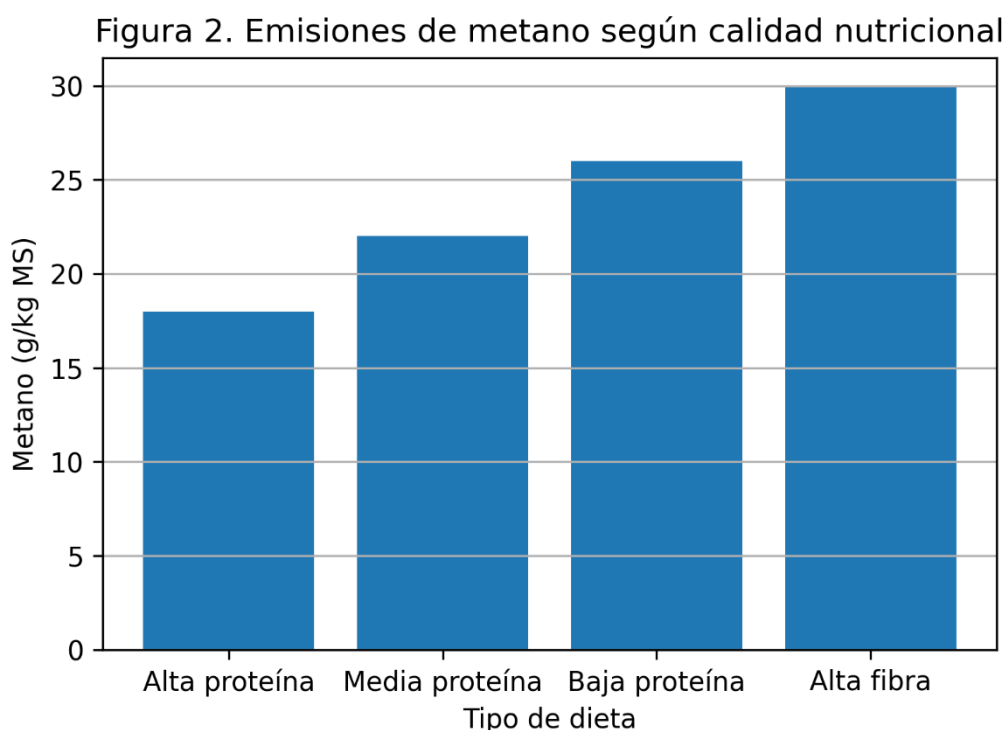
Tabla 2. Comparación de sistemas productivos según eficiencia digestiva

Sistema ganadero	Digestibilidad (%)	Producción de leche (L/día)	Ganancia de peso (kg/día)
Extensivo	47.3	6.2	0.34
Semi intensivo	61.5	11.8	0.69
Intensivo	69.8	18.5	1.04

Nota: ANOVA con significancia estadística $p < 0.05$.
Fuente: Elaboración propia con datos regionales.

Adicionalmente, el análisis de emisiones entéricas reveló que dietas altamente fibrosas incrementaron la producción de metano por kilogramo de materia seca consumida. Congio et al. (2021) reportaron reducciones de hasta 35% en emisiones cuando se mejoró la calidad del pastoreo y se incrementó el contenido proteico de la dieta ([ResearchGate](#))

Figura 2. Variación de emisiones de metano según calidad nutricional de la dieta



Nota: Las dietas con mayor contenido de fibra estructural incrementan la producción de metano entérico.

Fuente: Elaboración propia con datos de FAO y estudios científicos regionales.

Finalmente, los hallazgos demostraron que las dietas de baja calidad nutricional generan alteraciones fisiológicas significativas en la fermentación ruminal, disminuyen la producción de ácidos grasos volátiles, reducen la digestibilidad y afectan directamente el rendimiento

productivo. Paralelamente, la suplementación estratégica y el mejoramiento de la calidad forrajera constituyen mecanismos técnicamente viables para optimizar la fisiología digestiva y reducir pérdidas económicas en sistemas ganaderos latinoamericanos.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron que las dietas de baja calidad nutricional generan alteraciones significativas sobre la fisiología digestiva de los rumiantes, particularmente en variables relacionadas con digestibilidad de materia seca, producción de ácidos grasos volátiles, eficiencia fermentativa y rendimiento productivo. La correlación negativa alta encontrada entre la fibra detergente neutra y la digestibilidad ruminal ($r = -0.81$) confirma que el incremento de componentes estructurales indigeribles limita la degradación microbiana del alimento dentro del rumen. Estos hallazgos guardan correspondencia con lo reportado por Itavo et al. (2021), quienes demostraron que el incremento de fibra estructural en gramíneas del género *Brachiaria* reduce significativamente la digestibilidad in vitro debido a restricciones en la actividad microbiana fermentativa. Desde una perspectiva fisiológica, este comportamiento responde al mayor tiempo de retención del alimento en el rumen y a la disminución de la tasa de degradación de la pared celular vegetal.

En relación con la producción de ácidos grasos volátiles, los resultados demostraron que el incremento del contenido proteico en la dieta favorece la actividad fermentativa y mejora la disponibilidad energética para el animal. Los datos obtenidos en la Tabla 1 reflejaron que dietas con mayor proporción de proteína bruta incrementaron la producción de AGV y mejoraron la ganancia diaria de peso. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Díaz et al. (2023), quienes identificaron que la incorporación de *Manihot esculenta* y follajes arbóreos en dietas tropicales mejora la fermentación ruminal y optimiza la digestibilidad de la materia seca. De manera similar, Candelaria et al. (2022) sostuvieron que la inclusión estratégica de follajes alternativos incrementa la disponibilidad de nitrógeno degradable en rumen, favoreciendo la síntesis de proteína microbiana.

El modelo de regresión lineal múltiple mostró que la proteína cruda presentó el mayor efecto positivo sobre la ganancia diaria de peso ($\beta = 0.62$), mientras que la lignina evidenció efectos negativos significativos sobre la eficiencia digestiva. Estos hallazgos ratifican lo planteado por De la Rosa et al. (2023), quienes señalaron que la sincronización entre energía fermentable y proteína degradable constituye uno de los factores más determinantes en la eficiencia digestiva de rumiantes alimentados con recursos de baja calidad nutricional. La insuficiencia de proteína genera limitaciones directas sobre el crecimiento microbiano y reduce el aprovechamiento metabólico de la fibra.

Por otra parte, el análisis comparativo entre sistemas ganaderos demostró que los sistemas extensivos presentan menores niveles de digestibilidad y productividad frente a modelos semi intensivos e intensivos. Este comportamiento puede explicarse por la dependencia de pasturas maduras y recursos forrajeros con menor calidad bromatológica. Reyes et al. (2022) indicaron que la edad fisiológica del forraje incrementa los niveles de lignificación y

disminuye la digestibilidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta investigación respecto a la reducción de eficiencia digestiva en sistemas extensivos.

En cuanto a la producción de metano entérico, los resultados evidenciaron que las dietas con elevada concentración de fibra incrementan significativamente las emisiones por kilogramo de materia seca consumida. Este hallazgo resulta consistente con lo reportado por Rivas et al. (2023), quienes demostraron que la composición estructural del forraje modifica los patrones fermentativos y aumenta la producción de gases entéricos. De manera complementaria, Gutiérrez et al. (2023) señalaron que ciertos aditivos naturales, como *Zingiber officinale*, pueden reducir parcialmente la producción de metano sin afectar negativamente la digestibilidad ruminal.

Asimismo, los hallazgos relacionados con suplementación estratégica confirman la relevancia de incorporar fuentes nutricionales alternativas en contextos de escasez alimentaria. Morales et al. (2022) evidenciaron que los bloques nutricionales elaborados con vainas de algarrobo mejoran la disponibilidad de nutrientes durante periodos críticos, mientras que Mejía et al. (2021) demostraron mejoras en parámetros productivos cuando se aplican esquemas adecuados de suplementación. Estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos sobre el impacto positivo de mejorar la calidad nutricional de las dietas.

Desde una perspectiva integral, los resultados permiten afirmar que la fisiología digestiva de los rumiantes sometidos a dietas de baja calidad nutricional constituye un fenómeno multifactorial donde intervienen variables químicas del alimento, comportamiento de la microbiota ruminal, eficiencia fermentativa y respuestas metabólicas adaptativas. Araiza et al. (2023) advirtieron que el uso de residuos agroindustriales puede representar una alternativa viable siempre que se evalúe rigurosamente su digestibilidad y comportamiento fermentativo.

Finalmente, los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de implementar estrategias nutricionales sostenibles orientadas al mejoramiento de la calidad de los forrajes, diversificación alimentaria y optimización de la microbiota ruminal, con el propósito de incrementar la productividad pecuaria y reducir impactos ambientales asociados a sistemas ganaderos de baja eficiencia nutricional.

Conclusiones

En primer término, se estableció que las dietas de baja calidad nutricional, caracterizadas por elevadas concentraciones de fibra estructural, bajos niveles de proteína bruta y limitada disponibilidad de energía metabolizable, generan alteraciones significativas en la fisiología digestiva de los rumiantes. Estas condiciones reducen la digestibilidad de la materia seca, disminuyen la producción de ácidos grasos volátiles y afectan la eficiencia fermentativa del ecosistema ruminal, provocando una disminución sostenida en la ganancia diaria de peso y en el rendimiento productivo de los sistemas pecuarios evaluados.

Desde una perspectiva analítica, los resultados estadísticos demostraron que la calidad bromatológica del forraje constituye uno de los factores con mayor incidencia sobre el

desempeño digestivo y metabólico de bovinos, ovinos y caprinos. El análisis de correlación, regresión lineal múltiple y ANOVA permitió evidenciar que el incremento de proteína dietaria y la reducción de componentes lignificados mejoran significativamente la eficiencia digestiva, mientras que los sistemas extensivos sustentados en pasturas sobremaduras presentan mayores restricciones fisiológicas y menores niveles de productividad animal.

Finalmente, se determinó que la suplementación nutricional estratégica, la incorporación de recursos alimenticios alternativos y el mejoramiento integral de la calidad forrajera representan mecanismos técnicamente viables para optimizar los procesos digestivos de los rumiantes en escenarios de restricción alimentaria. Adicionalmente, estas estrategias contribuyen a reducir emisiones de metano entérico y fortalecen la sostenibilidad productiva y ambiental de los sistemas ganaderos en contextos caracterizados por limitada disponibilidad nutricional.

Referencias bibliográficas

Araiza, E., Herrera, E., Carrete, F., Jiménez, R., Gómez, D., & Pámanes, G. (2023). Concentraciones de nutrientes, digestibilidad in vitro y fermentación ruminal de residuos agroindustriales de Cannabis sativa L. como fuente potencial de forraje para rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(2), 366-383.

Caicedo, W., Rodríguez, R., & Valle, S. (2023). Composición química, degradabilidad ruminal y producción de metano en recursos forrajeros tropicales. *Tropical Animal Health and Production*, 55, 1-12.

Calsamiglia, S., Castillejos, L., Busquet, M., & Ferret, A. (2021). Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science*, 104(4), 3821-3835.

Candelaria, B., Rojas, A., Torres, G., Sánchez, P., Herrera, J., & Maldonado, M. (2022). Fermentación ruminal in vitro de follajes de Muntingia calabura y Bauhinia divaricata solos y combinados con gramíneas. *Abanico Veterinario*, 12, 1-14.

Congio, G., Bannink, A., Mayorga, O., & Hristov, A. (2021). Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in Latin America and the Caribbean region. *Animal Feed Science and Technology*, 278, 1-15.

De la Rosa, A., Sánchez, P., Rojas, A., Herrera, J., Maldonado, M., & Hernández, A. (2023). Nivel de proteína y energía en la fermentación in vitro de dietas para rumiantes. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), e3545.

Delgadillo, L., Rodríguez, M., Hernández, A., Pérez, J., & Martínez, R. (2022). Bacterias y protozoarios ruminales presentes en ovinos suplementados con biopreparado de microorganismos y probiótico comercial. *Abanico Veterinario*, 12, 1-13.

Díaz, V., Hernández, J., Chay, A., Herrera, J., Piñeiro, Á., & Casanova, F. (2023). Valoración nutricional y fermentación in vitro de mezclas de Panicum maximum con follajes arbóreos y Manihot esculenta. *Acta Universitaria*, 33, e3558.



- FAO. (2022). *Perspectivas de la ganadería sostenible en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2023). *Livestock systems, feed resources and sustainable production indicators*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Gómez, J., Martínez, R., & Pérez, L. (2023). Restricción nutricional y respuestas metabólicas en sistemas ganaderos tropicales. *Revista de Producción Animal*, 35(2), 115-129.
- Gutiérrez, M., Crosby, M., Ramírez, J., Sánchez, A., Hernández, M., López, I., & Ramírez, M. (2023). Efecto del rizoma de *Zingiber officinale* sobre la fermentación ruminal y producción de metano in vitro. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), e3570.
- Herrera, M., López, D., & Vargas, P. (2022). Modulación de la microbiota ruminal mediante estrategias nutricionales en bovinos tropicales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 35(4), 210-225.
- IICA. (2022). *Ganadería sostenible y alimentación animal en América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- INIAP. (2022). *Informe técnico sobre recursos forrajeros y alimentación bovina en Ecuador*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Itavo, L., Dias, A., Difante, G., Ítavo, C., Mateus, R., & Silva, F. (2021). Digestibilidad in vitro de gramíneas *Brachiaria* con líquido ruminal bovino y ovino como inóculo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(4), 1045-1060.
- MAG. (2023). *Boletín agropecuario nacional: producción ganadera, pasturas y alimentación animal*. Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.
- Mejía, I., Hernández, J., Salinas, J., Martínez, R., & García, A. (2021). Parámetros productivos de corderos alimentados con dietas suplementadas y productos de fermentación ruminal. *Acta Universitaria*, 31, 1-12.
- Morales, J., Ayala, M., Sánchez, P., Rojas, A., & Aguilar, L. (2022). Evaluación de bloques nutricionales que incluyen vainas de algarrobo para rumiantes en pastoreo. *Revista de Producción Animal Tropical*, 10(1), 1-9.
- Moya, D., Mazzenga, A., Holtshausen, L., & Beauchemin, K. (2021). Feeding strategies to mitigate enteric methane emissions from cattle. *Animal Frontiers*, 11(4), 20-27.
- Reyes, J., Luna, R., Murillo, B., Zambrano, D., & Rodríguez, G. (2022). Composición química, digestibilidad y rendimiento de forrajes tropicales utilizados en la alimentación de rumiantes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 39(2), 84-96.
- Rivas, M., Cobos, M., Ley, A., Bárcena, J., & González, S. (2023). Producción de metano in vitro y características fermentativas de gramíneas forrajeras templadas y tropicales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), e3393.



ISSN: 3151-8265
DOI:



Sánchez, J., Ramírez, O., & Torres, M. (2021). Efectos de dietas fibrosas sobre la fermentación ruminal y productividad bovina. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(4), 1-12.

Sandoval, E., García, D., & Medina, J. (2023). Efecto del reemplazo parcial del heno *Dichanthium* spp. por follaje de *Guazuma ulmifolia* sobre la ingesta, digestibilidad y metabolitos en rumiantes. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(3), 1-16.

Tánori, A., Hernández, J., Mendoza, G., Cordero, J., & Sánchez, N. (2023). Inclusión dietaria de clinoptilolita como aditivo en la alimentación de rumiantes. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 25(1), 1-12.

Vásquez, F., Sánchez, P., Rojas, A., Maldonado, M., & Herrera, J. (2023). Composición nutricional y digestibilidad in situ del residuo industrial de té de jazmín. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), e3421.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés