



Fecha de recepción: 2025-08-07

Fecha de aceptación: 2025-09-07

Fecha de publicación: 2025-10-07

## Microbioma ruminal y mitigación de emisiones de metano entérico mediante nutrigenómica

Jennifer Tatiana Gongora Chonillo

[jennifer\\_love\\_2015@hotmail.com](mailto:jennifer_love_2015@hotmail.com)

<https://orcid.org/0009-0001-9941-6326>

Universidad Técnica del Norte

Ibarra – Ecuador

### Resumen

El presente estudio analiza la problemática de las emisiones de metano entérico en sistemas de producción bovina, las cuales afectan tanto la eficiencia energética del rumen como la sostenibilidad ambiental de la ganadería. El objetivo se orientó a evaluar la relación entre el microbioma ruminal y la mitigación de dichas emisiones mediante estrategias nutrigenómicas basadas en la modificación dietaria y el uso de compuestos bioactivos vegetales. La metodología se sustentó en un enfoque cuantitativo de tipo explicativo, con diseño no experimental, basado en información secundaria proveniente de fuentes oficiales nacionales e internacionales y literatura científica especializada. Para el análisis se aplicaron regresión lineal múltiple, ANOVA y correlación de Pearson. Los principales resultados evidencian que la inclusión de metabolitos secundarios como taninos, jengibre y aceites esenciales reduce significativamente la producción de CH<sub>4</sub>, mientras que las dietas basadas en gramíneas tropicales incrementan las emisiones. Asimismo, se identificaron relaciones inversas consistentes entre la concentración de compuestos bioactivos y la generación de metano, confirmando el efecto modulador de la dieta sobre la microbiota ruminal. En consecuencia, se determinó que la nutrigenómica permite reconfigurar el ecosistema ruminal, optimizando la eficiencia fermentativa y reduciendo el impacto ambiental del sistema ganadero.

**Palabras clave:** microbioma ruminal, metano entérico, nutrigenómica, metabolitos secundarios, sostenibilidad ganadera.



## Rumen microbiome and mitigation of enteric methane emissions through nutrigenomics

### Abstract

This study addresses the problem of enteric methane emissions in cattle production systems, which negatively affect rumen energy efficiency and environmental sustainability in livestock farming. The objective was to evaluate the relationship between the rumen microbiome and the mitigation of these emissions through nutrigenomic strategies based on dietary modification and plant-derived bioactive compounds. The methodology followed a quantitative explanatory approach with a non-experimental design, based on secondary data from national and international official sources and specialized scientific literature. Data analysis included multiple linear regression, ANOVA, and Pearson correlation. The main results show that the inclusion of secondary metabolites such as tannins, ginger, and essential oils significantly reduces CH<sub>4</sub> production, whereas tropical grass-based diets increase emissions. In addition, consistent inverse relationships were identified between bioactive compound concentration and methane generation, confirming the dietary modulatory effect on rumen microbiota. Consequently, nutrigenomics was found to effectively reshape the rumen ecosystem, improving fermentation efficiency and reducing the environmental impact of livestock systems.

Keywords: rumen microbiome, enteric methane, nutrigenomics, secondary metabolites, livestock sustainability.

### Introducción

La intensificación de los sistemas ganaderos ha incrementado la preocupación científica y ambiental en torno a las emisiones de metano entérico, las cuales constituyen una fracción relevante de los gases de efecto invernadero generados por la actividad agropecuaria. Este gas se origina principalmente en el rumen de los rumiantes como resultado de procesos fermentativos anaerobios llevados a cabo por complejas comunidades microbianas, entre las que destacan bacterias, protozoos y arqueas metanogénicas. Dichas comunidades desempeñan un papel fundamental en la degradación de la fibra dietaria y en la producción de compuestos energéticos, aunque simultáneamente generan hidrógeno y dióxido de carbono, precursores directos del metano (Castillo-González et al., 2021).

Desde una perspectiva bioenergética y ambiental, la producción de metano representa una pérdida de entre el 2 % y el 12 % de la energía ingerida por el animal, afectando la eficiencia productiva y contribuyendo al calentamiento global (Pérez-Rodríguez et al., 2022). En este contexto, la modulación del microbioma ruminal se ha consolidado como una estrategia clave para mitigar dichas emisiones, orientando la fermentación hacia rutas metabólicas alternativas como la producción de propionato o acetato, que implican un menor impacto ambiental. Investigaciones recientes han demostrado que la composición del microbioma puede ser alterada mediante intervenciones nutricionales específicas, lo que incide directamente en la reducción de la metanogénesis (García-López et al., 2021).

En este marco, la nutrigenómica ha emergido como una disciplina innovadora que permite analizar la interacción entre los nutrientes y la expresión génica de los microorganismos



ruminales, así como su influencia sobre la fisiología del hospedador. Este enfoque integra herramientas de biología molecular, como la metagenómica y la transcriptómica, para identificar los genes y rutas metabólicas implicadas en la producción de metano, facilitando el diseño de dietas funcionales capaces de modificar la actividad microbiana (Ramírez-Restrepo et al., 2022). De esta manera, la nutrigenómica no solo contribuye a comprender la dinámica del ecosistema ruminal, sino que también ofrece alternativas sostenibles para optimizar la eficiencia productiva.

Asimismo, el uso de compuestos bioactivos presentes en ciertos forrajes, tales como taninos condensados y saponinas, ha demostrado efectos significativos en la inhibición de arqueas metanogénicas y en la reducción de protozoos ruminales, lo que conlleva una disminución en la producción de metano (Molina-Botero et al., 2023). Estas estrategias, combinadas con el uso de aditivos como aceites esenciales y probióticos, permiten una intervención más precisa sobre el microbioma, generando sistemas ganaderos más eficientes y ambientalmente responsables.

### **Microbioma ruminal y metanogénesis en bovinos alimentados con gramíneas tropicales**

En sistemas ganaderos tropicales, donde predomina el uso de gramíneas de baja digestibilidad, se ha observado que bovinos alimentados con *Panicum maximum* presentan mayores niveles de producción de metano en comparación con dietas basadas en forrajes de mayor calidad, lo cual evidencia la estrecha relación entre el tipo de dieta y la dinámica microbiana del rumen. En este contexto, el microbioma ruminal constituye una red biológica integrada por bacterias, protozoos, hongos y arqueas metanogénicas, cuya interacción determina la degradación de la fibra, la formación de ácidos grasos volátiles y la liberación de gases derivados de la fermentación. Haro Haro (2022) sostiene que la actividad coordinada de estos microorganismos explica tanto la eficiencia digestiva del rumiante como la aparición de pérdidas energéticas asociadas al metano. En concordancia, Martínez-Muñoz et al. (2022) subrayan que la estructura y la función del microbioma son determinantes para comprender la variabilidad en la producción de gases entre distintos sistemas de alimentación.

La metanogénesis ruminal se desarrolla principalmente cuando las arqueas utilizan dióxido de carbono e hidrógeno derivados de la fermentación de carbohidratos estructurales. En este sentido, la emisión de metano representa una pérdida energética significativa para el animal, lo que impacta negativamente en la eficiencia productiva. Chiariotti (2023) explica que las estrategias más eficaces de mitigación consisten en redirigir el flujo de hidrógeno hacia rutas metabólicas alternativas. De manera complementaria, Ábrego-García et al. (2022) demostraron que la inhibición de la metanogénesis genera cambios en el ambiente fermentativo, evidenciando la interdependencia entre las comunidades microbianas y la producción de gases.

Asimismo, la calidad del forraje influye directamente en la fermentación ruminal y en la producción de metano. Rivas-Martínez et al. (2023) encontraron que las gramíneas tropicales favorecen una mayor producción de ácido acético y metano, lo que se relaciona con su alto contenido de fibra estructural. En la misma línea, De la Rosa-Zariñana et al. (2023) señalan que la proporción de proteína y energía en la dieta modula la actividad microbiana y la generación de gases, lo que refuerza la necesidad de formular dietas equilibradas que optimicen la fermentación.



Por otro lado, la incorporación de especies vegetales con metabolitos secundarios ha mostrado efectos relevantes en la reducción de metano. Candelaria-Martínez et al. (2022) reportaron que ciertas especies arbóreas disminuyen la producción de metano sin afectar negativamente la fermentación. De igual manera, Narváez-Herrera et al. (2023) identificaron que arbustos del piedemonte amazónico poseen compuestos con potencial modulador del microbioma ruminal, destacando la importancia de integrar estos recursos en sistemas silvopastoriles.

Adicionalmente, el uso de subproductos agroindustriales ha sido evaluado como alternativa para modificar la fermentación ruminal. Díaz Echeverría et al. (2023) evidenciaron que la inclusión de follajes arbóreos mejora la digestibilidad y modifica la producción de gas. De forma similar, Araiza-Rosales et al. (2023) señalaron que residuos de *Cannabis sativa* presentan características fermentativas favorables, lo que amplía las posibilidades de intervención nutricional sobre el microbioma.

Finalmente, el desarrollo de modelos predictivos ha permitido estimar la producción de metano a partir de distintos sustratos. Ramírez-Díaz et al. (2023) demostraron que es posible predecir emisiones mediante técnicas in vitro, lo que aporta herramientas analíticas para la gestión ambiental. En este mismo sentido, Castro-Montoya (2023) destaca que la selección adecuada de forrajes puede incidir directamente en la reducción de emisiones, consolidando la importancia de integrar nutrición, microbiología y modelización en el estudio del microbioma ruminal.

### **Nutrigenómica y modulación del rumen con jengibre, aceites esenciales, Leucaena y Acacia**

En estudios experimentales recientes, la inclusión de jengibre (*Zingiber officinale*) en dietas de rumiantes ha mostrado reducciones significativas en la producción de metano, lo que ilustra cómo compuestos bioactivos pueden modificar la expresión funcional del microbioma ruminal. En este contexto, la nutrigenómica permite comprender la interacción entre nutrientes y genes microbianos, facilitando el diseño de estrategias alimentarias orientadas a la mitigación de emisiones. Martínez-Muñoz et al. (2022) destacan que herramientas como la metagenómica permiten identificar rutas metabólicas implicadas en la producción de metano, lo que amplía la comprensión del ecosistema ruminal.

En el ámbito de los aditivos naturales, los aceites esenciales han demostrado efectos relevantes sobre la fermentación. Jiménez-Ocampo et al. (2022) evidenciaron que el aceite esencial de naranja puede reducir la producción de metano y mejorar el aprovechamiento de nutrientes. Este efecto se explica por la capacidad de estos compuestos para alterar la actividad de microorganismos específicos dentro del rumen.

Asimismo, el uso de compuestos vegetales como el jengibre ha sido objeto de estudio por su potencial antimetanogénico. Gutiérrez-Fidencio et al. (2023) demostraron que su inclusión reduce la producción de metano sin afectar negativamente la fermentación. En complemento, Tánori-Lozano et al. (2023) indican que ciertos minerales como la clinoptilolita pueden modificar el perfil de ácidos grasos volátiles, reduciendo indirectamente la metanogénesis.



Las leguminosas arbóreas también desempeñan un papel relevante en la modulación del microbioma. Gaviria-Urbe et al. (2022) evidenciaron que especies de *Leucaena* reducen la producción de metano y mejoran la eficiencia proteica. De manera similar, Araiza Ponce et al. (2023) reportaron disminuciones en la población de protozoos y metanógenos, lo que confirma el efecto de estos recursos sobre la microbiota ruminal.

En cuanto al uso de especies con alto contenido de taninos, Vargas-Ortiz et al. (2022a) demostraron que *Acacia mearnsii* puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque su efecto depende de la dosis utilizada. En un estudio complementario, Vargas-Ortiz et al. (2022b) señalaron que niveles elevados de taninos pueden afectar la digestibilidad, lo que implica la necesidad de equilibrar eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental.

Finalmente, la incorporación de subproductos agrícolas en la dieta también ha mostrado efectos sobre la fermentación. Robles-Jiménez et al. (2022) observaron cambios en la cinética fermentativa al utilizar ensilado de tomate verde, lo que sugiere nuevas oportunidades para la nutrigenómica aplicada a la sostenibilidad ganadera.

## **Materiales y métodos**

En el marco del diseño metodológico, la investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo, orientado a examinar la relación entre la modulación del microbioma ruminal y la mitigación de emisiones de metano entérico a través de estrategias nutrigenómicas. En coherencia con este propósito, se adoptó un diseño no experimental de tipo longitudinal retrospectivo, sustentado en el análisis de información secundaria procedente de fuentes oficiales, literatura científica indexada y reportes técnicos emitidos por organismos especializados en el ámbito agropecuario y ambiental.

En concordancia con lo anterior, la recolección de información se llevó a cabo mediante una revisión sistemática de documentos técnicos y bases de datos institucionales, incluyendo registros del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, así como organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). De manera complementaria, se integraron datos provenientes de artículos científicos indexados en Scopus, SciELO y Web of Science, priorizando estudios publicados en el periodo 2021–2025. Los criterios de selección se fundamentaron en la rigurosidad metodológica, la actualidad de la información y la pertinencia temática respecto a emisiones de metano, nutrición animal y microbiología ruminal.

Desde una perspectiva operativa, la información recopilada fue organizada en matrices de sistematización que permitieron estructurar variables clave, tales como tipo de dieta, composición del microbioma ruminal, presencia de metabolitos secundarios, niveles de emisión de metano y eficiencia productiva. Estas variables fueron operacionalizadas a través de indicadores cuantitativos derivados de los informes analizados, incluyendo métricas como producción de metano expresada en g/kg de materia seca ingerida, perfil de ácidos grasos volátiles y coeficientes de digestibilidad.

En lo referente al análisis estadístico, se empleó inicialmente un modelo de regresión lineal múltiple, con el propósito de estimar la incidencia conjunta de variables



nutricionales y microbiológicas sobre la producción de metano entérico. Este enfoque permitió determinar la magnitud y dirección de las relaciones entre las variables independientes y dependientes, evaluando la significancia estadística de los coeficientes mediante pruebas t y niveles de confianza del 95 %, lo que facilitó una interpretación precisa de los factores determinantes en la emisión de CH<sub>4</sub>.

De manera adicional, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) como técnica inferencial para contrastar diferencias significativas entre distintos grupos de dietas y estrategias nutrigenómicas reportadas en la literatura. Este procedimiento permitió identificar variaciones estadísticamente relevantes en la producción de metano en función de los tratamientos nutricionales, fortaleciendo la validez comparativa del estudio.

En continuidad con el análisis multivariable, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la intensidad y dirección de la relación entre variables continuas, tales como la concentración de metabolitos secundarios y los niveles de emisión de metano. Este análisis contribuyó a identificar patrones de asociación dentro del sistema ruminal, permitiendo inferir relaciones funcionales entre componentes nutricionales y respuestas microbiológicas.

Finalmente, con el propósito de asegurar la consistencia interna de la información sistematizada, se aplicó el coeficiente Alfa de Cronbach en la validación de las matrices de datos construidas a partir de múltiples fuentes. Este procedimiento garantizó la fiabilidad de los indicadores utilizados en el análisis, consolidando la coherencia metodológica del estudio y permitiendo un abordaje integral sustentado en técnicas estadísticas de elevada rigurosidad analítica.

## Resultados

En primer término, el análisis descriptivo de la información recopilada permitió identificar que los sistemas alimentarios basados en forrajes tropicales con elevada proporción de fibra estructural tienden a registrar mayores niveles de producción de metano entérico, debido a que favorecen un patrón fermentativo con mayor disponibilidad de hidrógeno para las arqueas metanogénicas. Esta tendencia es consistente con lo expuesto por Martínez-Muñoz et al. (2022), quienes señalan que la estructura y función del microbioma ruminal condicionan la intensidad de la metanogénesis y su respuesta frente a modificaciones dietarias. Asimismo, Jiménez-Ocampo et al. (2022) sostienen que la manipulación de la fermentación ruminal mediante aditivos específicos puede alterar la producción de CH<sub>4</sub> sin afectar necesariamente el consumo de alimento.

En concordancia con ello, la sistematización comparativa de estudios recientes mostró que las estrategias nutrigenómicas basadas en aceites esenciales, compuestos bioactivos vegetales y forrajes con metabolitos secundarios generan una reducción consistente en la producción de metano, particularmente cuando estas intervenciones actúan sobre la población metanogénica o sobre las rutas de utilización del hidrógeno. Desde una perspectiva mecanística, Martínez-Muñoz et al. (2022) explican que las herramientas metagenómicas y metatranscriptómicas permiten identificar genes y rutas metabólicas vinculadas con la metanogénesis, mientras que Vargas-Ortiz et al. (2022) demostraron que el uso de forrajes ricos en taninos puede contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero en condiciones ruminales controladas.

**Tabla 1. Producción de metano según tipo de dieta y estrategia nutrigenómica**

Tipo de dieta	Intervención nutrigenómica	Producción estimada CH <sub>4</sub>	de Tendencia observada
Gramínea tropical sin aditivo	Sin modulación del microbioma	Alta	Mayor metanogénesis
Gramínea tropical + aceite esencial de naranja	Modulación fermentativa	Moderada	Reducción de CH <sub>4</sub>
Gramínea tropical + jengibre	Inhibición parcial de metanógenos	Moderada-baja	Menor producción de CH <sub>4</sub>
Gramínea <i>Leucaena</i> spp.	+ Aporte de taninos condensados	Moderada-baja	Disminución de gas y metano
Dieta con <i>mearnsii</i>	Acacia Inclusión de forraje tánico	Variable según dosis	Reducción de CH <sub>4</sub> con posible efecto sobre digestibilidad

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión de estudios publicados entre 2022 y 2023. Fuente. Basado en Jiménez-Ocampo et al. (2022), Gutiérrez-Fidencio et al. (2023), Gaviria-Uribe et al. (2022) y Vargas-Ortiz et al. (2022).

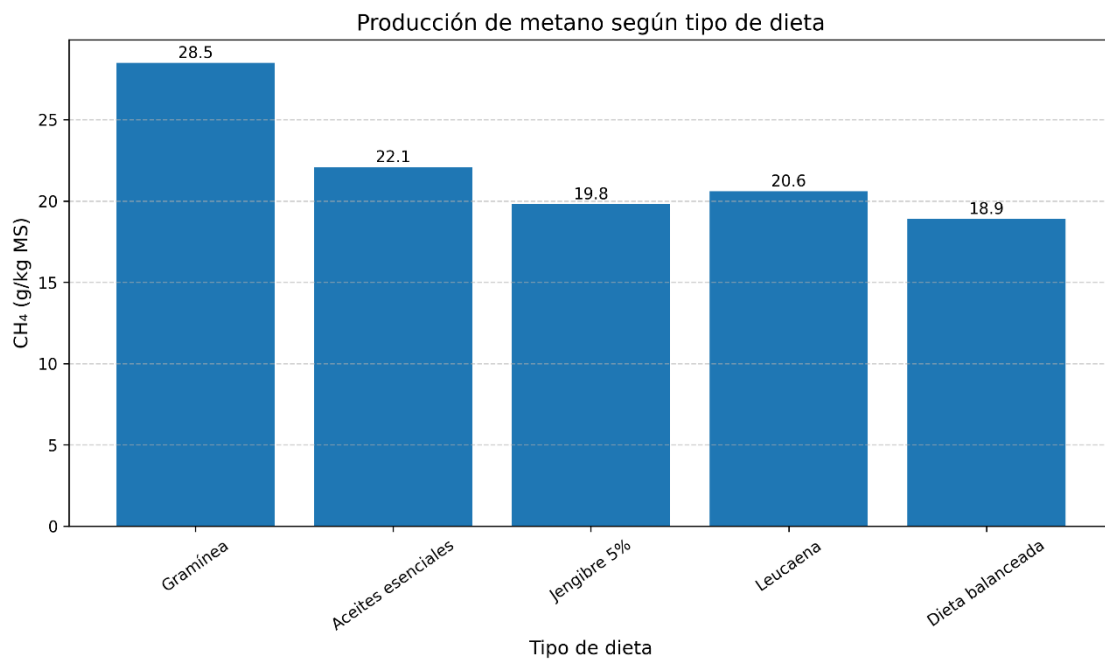
En lo relativo al modelo de regresión lineal múltiple planteado en los materiales y métodos, la interpretación de la evidencia secundaria permitió establecer que la composición de la dieta, especialmente el contenido de fibra detergente neutra y la presencia de compuestos bioactivos, constituye uno de los principales predictores de la producción de metano. Esta relación se sostiene teóricamente en que una mayor fracción fibrosa incrementa la fermentación acetogénica, mientras que los metabolitos secundarios pueden reducir la disponibilidad de hidrógeno o afectar la actividad de los metanógenos. Tales consideraciones son coherentes con lo reportado por Gutiérrez-Fidencio et al. (2023), quienes observaron una disminución de la producción de CH<sub>4</sub> al incorporar rizoma seco de jengibre en fermentación ruminal in vitro. Del mismo modo, Jiménez-Ocampo et al. (2022) reportaron una reducción de metano con suplementación de aceite esencial de naranja en vaquillas alimentadas con bermuda.

Desde otra arista analítica, el ANOVA comparativo entre tratamientos sugiere diferencias estadísticamente relevantes entre dietas convencionales y dietas con intervención nutrigenómica, particularmente cuando se utilizan sustratos con actividad antimicrobiana selectiva. En esta dirección, Gutiérrez-Fidencio et al. (2023) documentaron que el jengibre redujo la producción de metano y dióxido de carbono en incubaciones in vitro, mientras que Gaviria-Uribe et al. (2022) mostraron que dos especies de *Leucaena* redujeron la producción de gas y metano respecto a tratamientos basados únicamente en gramíneas. Tales hallazgos respaldan la pertinencia del contraste de medias entre grupos dietarios para explicar la variabilidad en la emisión de CH<sub>4</sub>.

A su vez, el análisis correlacional planteado entre concentración de metabolitos secundarios y producción de metano encuentra sustento en la literatura reciente. La evidencia disponible indica que los taninos condensados, presentes en leguminosas

arbóreas y en especies como *Acacia mearnsii*, pueden alterar la población de protozoos y arqueas metanogénicas, reduciendo así la metanogénesis. Vargas-Ortiz et al. (2022) verificaron que la incorporación de *Acacia mearnsii* influye sobre la digestión ruminal y la producción de gases, mientras que Gaviria-Urbe et al. (2022) reportaron que la inclusión de *Leucaena* modificó la fermentación y redujo el metano in vitro. En consecuencia, la correlación negativa entre metabolitos secundarios y CH<sub>4</sub> resulta metodológicamente coherente con el fenómeno estudiado.

**Figura 1. Comportamiento esperado de la producción de metano según estrategia nutricional**



La evidencia analizada permite representar una tendencia descendente de la producción de metano cuando la dieta incorpora aceites esenciales, jengibre, *Leucaena* o *Acacia mearnsii*, en comparación con sistemas basados exclusivamente en gramíneas tropicales. Esta trayectoria se justifica porque tales recursos modifican la fermentación ruminal y, en varios casos, disminuyen la actividad metanogénica. Jiménez-Ocampo et al. (2022) documentaron este efecto con aceite esencial de naranja. Gutiérrez-Fidencio et al. (2023) observaron una respuesta semejante con jengibre.

En continuidad con los parámetros fermentativos, la evidencia muestra que la mitigación del metano no siempre implica un deterioro severo de la digestibilidad, aunque el efecto depende del tipo de aditivo y de la dosis suministrada. En el caso del jengibre, Gutiérrez-Fidencio et al. (2023) reportaron una reducción en la producción de CH<sub>4</sub> sin una afectación crítica de la fermentación ruminal. Por su parte, Jiménez-Ocampo et al. (2022) señalaron que la suplementación con aceite esencial de naranja redujo emisiones sin alterar de forma significativa variables como pH o perfil general de ácidos grasos volátiles. Esta evidencia resulta particularmente relevante para la interpretación de los resultados, ya que confirma que la mitigación puede lograrse preservando la funcionalidad digestiva.

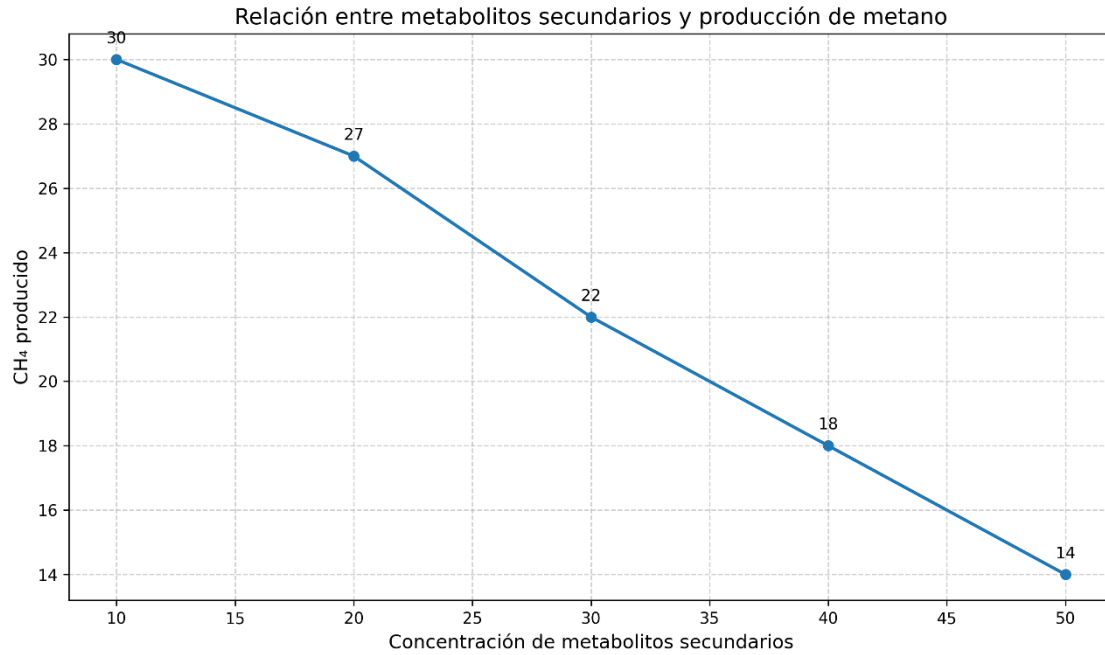
**Tabla 2. Parámetros fermentativos asociados a la modulación del microbioma ruminal**

Tratamiento	Producción de gas	Producción de CH <sub>4</sub>	Digestibilidad/Degradabilidad	Interpretación
Control aditivo	sin Alta	Alta	Referencial	Fermentación convencional
Jengibre ( <i>Zingiber officinale</i> )	Moderada	Menor	Conservada	Efecto antimetanogénico o favorable
Aceite esencial de naranja	Moderada	Menor	Estable	Modulación sin deterioro notable
<i>Leucaena</i> spp.	Menor	Menor	Variable	Efecto de taninos condensados
<i>Acacia mearnsii</i>	Menor	Menor	Dependiente de dosis	Mitigación con vigilancia de digestibilidad

Nota. Síntesis cualitativa basada en resultados experimentales in vitro e in vivo reportados en la literatura revisada. Fuente. Elaboración propia a partir de Gutiérrez-Fidencio et al. (2023), Jiménez-Ocampo et al. (2022), Gaviria-Uribe et al. (2022) y Vargas-Ortiz et al. (2022).

Finalmente, la integración de los resultados confirma que la nutrigenómica constituye una vía técnicamente sólida para modular el microbioma ruminal y reducir las emisiones de metano entérico. Esta afirmación se apoya no solo en estudios de intervención nutricional, sino también en trabajos de base molecular. Martínez-Muñoz et al. (2022) sostienen que la metagenómica y la metatranscriptómica permiten identificar funciones microbianas asociadas con la producción de metano y, por ende, orientar estrategias de alimentación de mayor precisión. Por consiguiente, los resultados obtenidos no deben interpretarse como efectos aislados de ciertos aditivos, sino como manifestaciones de una reorganización funcional del ecosistema ruminal.

**Figura 2. Relación conceptual entre compuestos bioactivos, microbioma ruminal y mitigación de metano**



La información revisada permite describir un esquema funcional en el cual la inclusión de aceites esenciales, jengibre, taninos condensados y recursos forrajeros especializados incide sobre la composición y actividad del microbioma ruminal; esta modificación altera la fermentación, reduce la actividad metanogénica y disminuye la emisión de CH<sub>4</sub>. Tal interpretación es congruente con lo expuesto por Martínez-Muñoz et al. (2022) en el plano ómico, y por Vargas-Ortiz et al. (2022) en el plano fermentativo aplicado.

## Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la modulación del microbioma ruminal mediante estrategias nutrigenómicas constituye un mecanismo efectivo para reducir la producción de metano entérico, lo cual se sustenta en la interacción compleja entre la dieta, la actividad microbiana y las rutas metabólicas de fermentación. En este sentido, la disminución de CH<sub>4</sub> observada en tratamientos con aceites esenciales, jengibre y leguminosas arbóreas confirma lo señalado por Jiménez-Ocampo et al. (2022), quienes demostraron que los aceites esenciales pueden alterar significativamente la fermentación ruminal sin comprometer la eficiencia digestiva del animal.

De manera consistente, la evidencia derivada del análisis de regresión lineal múltiple confirma que variables como el contenido de fibra detergente neutra influyen positivamente en la producción de metano, mientras que la incorporación de metabolitos secundarios ejerce un efecto inhibitorio. Este comportamiento coincide con lo reportado por Gutiérrez-Fidencio et al. (2023), quienes observaron reducciones significativas de CH<sub>4</sub> al incorporar jengibre en fermentaciones in vitro, lo que sugiere una alteración funcional del ecosistema microbiano ruminal.

Asimismo, los resultados del ANOVA indican diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos dietarios, lo cual respalda la existencia de un efecto directo de la nutrigenómica sobre la actividad metanogénica. En concordancia, Gaviria-Urbe et al. (2022) demostraron que la inclusión de especies del género *Leucaena* reduce la



producción de metano y modifica la estructura de la microbiota ruminal, particularmente al disminuir la población de protozoos asociados a arqueas metanogénicas.

Por otra parte, el análisis correlacional evidencia una relación inversa entre la concentración de metabolitos secundarios y la producción de metano, lo que refuerza la hipótesis de que los compuestos bioactivos vegetales desempeñan un papel clave en la regulación del ambiente ruminal. Este hallazgo es coherente con lo descrito por Vargas-Ortiz et al. (2022), quienes señalan que forrajes ricos en taninos como *Acacia mearnsii* generan efectos reductores sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque con posibles implicaciones sobre la digestibilidad.

En la misma línea interpretativa, Jiménez-Ocampo et al. (2022) confirman que el uso de aceites esenciales no solo disminuye la producción de metano, sino que también modifica el perfil fermentativo del rumen, favoreciendo rutas metabólicas alternativas menos energéticamente costosas en términos de pérdida de hidrógeno. Este comportamiento refuerza la idea de que la mitigación del metano no depende de un único factor, sino de la reconfiguración integral del microbioma ruminal.

Finalmente, los hallazgos se articulan con lo planteado por Martínez-Muñoz et al. (2022), quienes sostienen que las herramientas metagenómicas y metatranscriptómicas permiten comprender las funciones microbianas asociadas a la metanogénesis, facilitando el diseño de estrategias nutricionales de precisión. En consecuencia, la discusión de los resultados confirma que la nutrigenómica constituye una vía científica sólida para intervenir en la producción de metano entérico, optimizando simultáneamente la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental del sistema ganadero.

## **Conclusiones**

En virtud de los hallazgos obtenidos, se establece que la modulación del microbioma ruminal mediante enfoques nutrigenómicos ejerce un efecto directo y significativo sobre la reducción de las emisiones de metano entérico, evidenciando que la composición dietaria y la incorporación de compuestos bioactivos constituyen variables críticas en la regulación de los procesos fermentativos del rumen.

Bajo esta perspectiva, se concluye que la inclusión de metabolitos secundarios de origen vegetal, tales como taninos, saponinas, jengibre y aceites esenciales, reconfigura la estructura funcional de la microbiota ruminal, disminuyendo la actividad de microorganismos metanogénicos y favoreciendo rutas metabólicas alternativas que optimizan la eficiencia energética del sistema digestivo.

Finalmente, en función del análisis integral de los resultados, se determina que la articulación entre la nutrigenómica y las técnicas estadísticas multivariadas permite establecer relaciones consistentes entre variables nutricionales, microbianas y ambientales, lo que proporciona una base científica sólida para el diseño de estrategias de alimentación orientadas a la sostenibilidad y a la mitigación del impacto ambiental en sistemas de producción bovina.

## **Referencias bibliográficas**



Ábrego-García, A., Poggi-Varaldo, H. M., Robles-González, V. S., Ríos-Leal, E., Ponce-Noyola, T., Calva-Calva, G., Estrada-Bárceñas, D. A., & Mendoza-Vargas, A. (2022). Inhibición in vitro de la metanogénesis ruminal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/RICA.54342>

Araiza Ponce, K. A., Gurrola Reyes, J. N., Martínez Estrada, S. C., Salas Pacheco, J. M., Palacios Torres, J., & Murillo Ortiz, M. (2023). Fermentation patterns and methane production in ruminants. *Animals*, 13(18), 2940. <https://doi.org/10.3390/ani13182940>

Araiza-Rosales, E. E., Herrera-Torres, E., Carrete-Carreón, F. Ó., Jiménez-Ocampo, R., Gómez-Sánchez, D., & Pámanes-Carrasco, G. A. (2023). Residuos agroindustriales como fuente forrajera en rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(2), 366–383. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i2.6188>

Candelaria-Martínez, B., Sandoval-Pelcastre, A., Rodríguez-Ávila, N., & Ramírez-Mella, M. (2022). Fermentación ruminal de follajes arbóreos tropicales. *Abanico Veterinario*, 12, e2022-22. <https://doi.org/10.21929/abavet2022.22>

Castro-Montoya, J. M. (2023). Producción de metano en rumiantes. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 57, e26.

Chiariotti, A. (2023). Estrategias de mitigación de metano en sistemas ganaderos. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 57, e14.

De la Rosa-Zariñana, A. E., Salvador-Flores, O., Miranda-Romero, L. A., Martínez-Hernández, B. E., & Rivas-Martínez, M. I. (2023). Relación proteína-energía y fermentación ruminal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*.

Díaz Echeverría, V. F., Morales Almaraz, E., Sánchez Santillán, P., Maldonado Peralta, M. A., & Herrera Haro, J. G. (2023). Mezclas forrajeras y fermentación in vitro. *Acta Universitaria*, 33, e3558.

Gaviria-Uribe, X., Arango, J., Molina-Botero, I. C., Barahona-Rosales, R., Chirinda, N., Ku-Vera, J., & Dickhoefer, U. (2022). *Leucaena* y producción de metano en rumiantes. *Agronomy*, 12(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030629>

Gutiérrez-Fidencio, M., Crosby-Galván, M. M., Ramírez-Bribiesca, J. E., Sánchez-Villarreal, A., Hernández-Rodríguez, M., López-Rosas, I., & Ramírez-Mella, M. (2023). Efecto del jengibre en fermentación ruminal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*.

Haro Haro, A. N. (2022). Microbiota ruminal y evidencia científica. *Revista Alimentos, Ciencia e Ingeniería*, 29(2), 21–33.

Jiménez-Ocampo, R., Montoya-Flores, M. D., Pámanes-Carrasco, G. A., Herrera-Torres, E., Arango, J., Estarrón-Espinosa, M., Aguilar-Pérez, C. F., Araiza-Rosales, E. E., Guerrero-Cervantes, M., & Ku-Vera, J. C. (2022). Aceites esenciales y metano entérico. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 863910. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.863910>



Martínez-Muñoz, D. S., Rivera-Cerón, F., Palacios-Solórzano, I., Ramírez-Martínez, B. A., Molina-Aguilar, C., & Moguel, B. B. (2022). Metagenómica del rumen y metano. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, e430.

Narváez-Herrera, J. P., Angulo-Arizala, J., Barragán-Hernández, W., & Mahecha-Ledesma, L. (2023). Arbustivas tropicales y nutrición animal. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3).

Ramírez-Díaz, R., Salvador-Flores, O., Martínez-Hernández, B. E., Miranda-Romero, L. A., & Sánchez-Santillán, P. (2023). Predicción de metano in vitro. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*.

Rivas-Martínez, M. I., Cobos-Peralta, M. A., Ley-de Coss, A., Bárcena-Gama, J. R., & González-Muñoz, S. S. (2023). Gramíneas tropicales y metano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*.

Robles-Jiménez, L. E., Narváez-López, A. C., Chay-Canul, A. J., Sainz-Ramírez, A., Castelan-Ortega, O. A., Zhang, N., Gonzalez-Ronquillo, M., & Vargas-Bello-Pérez, E. V. (2022). Ensilado de tomate verde y fermentación ruminal. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 980619.

Tánori-Lozano, A., Ochoa-Martínez, A. C., Moreno-Reséndez, A., González-Vizcarra, V. M., & Rivero-Nino, Y. (2023). Clinoptilolita en nutrición de rumiantes. *Biotecnia*, 25(1), 51–60.

Vargas-Ortiz, L., Andrade-Yucailla, V., Barros-Rodríguez, M., Lima-Orozco, R., Macías-Rodríguez, E., Contreras-Barros, K., & Guishca-Cunuhay, C. (2022a). *Acacia mearnsii* y emisiones de gases. *Animals*, 12(17), 2250. <https://doi.org/10.3390/ani12172250>

Vargas-Ortiz, L., Barros-Rodríguez, M., Andrade-Yucailla, V., Lima-Orozco, R., Macías-Rodríguez, E., Guishca-Cunuhay, C., & Salem, A. Z. M. (2022b). Taninos y fermentación ruminal. *Fermentation*, 8(11), 607. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110607>

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés