

***Asparagopsis taxiformis* y extractos vegetales alternativas en la reducción de metano en rumiantes: revisión**

**Methane mitigation by *asparagopsis taxiformis* and plant extracts in ruminants: a review**

***Asparagopsis taxiformis* e extratos vegetais como alternativas na redução de metano em ruminantes: revisão de literatura**

Endara Arteaga Mariana Jesús<sup>1</sup>  
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López  
[mariana.endara.0220@espam.edu.ec](mailto:mariana.endara.0220@espam.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0005-0913-0279>



Rincón Acosta Fernando<sup>2</sup>  
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López  
[fjrincon@espam.edu.ec](mailto:fjrincon@espam.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-5670-1488>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1492>

**Como citar:**

Endara-Arteaga, M, J. & Rincón-Acosta, F. (2026). *Asparagopsis taxiformis* y extractos vegetales alternativas en la reducción de metano en rumiantes: revisión. *Código Científico Revista de Investigación*, 7(1), 1049-1070.

**Recibido:** 30/04/2026

**Aceptado:** 29/05/2026

**Publicado:** 30/06/2026

## Resumen

La fermentación entérica de los rumiantes constituye una fuente relevante de emisiones de metano, gas con elevado potencial de calentamiento global, además de representar una pérdida de energía metabolizable para el animal. El presente artículo tuvo como finalidad evaluar el potencial de *Asparagopsis taxiformis* y de diversos extractos vegetales bioactivos como estrategias nutricionales orientadas a disminuir la producción de metano ruminal y mejorar la sostenibilidad de los sistemas pecuarios. La investigación se desarrolló mediante una revisión científica de carácter descriptivo, analítico y sintético, sustentada en los métodos inductivo-deductivo y crítico-comparativo para la interpretación de la evidencia disponible. Como técnica de investigación se empleó la revisión bibliográfica sistematizada de literatura científica indexada publicada entre 2019 y 2025 en bases de datos especializadas. Los instrumentos de recopilación de información estuvieron constituidos por artículos científicos, revisiones sistemáticas, metaanálisis y documentos académicos incluidos en la bibliografía general del estudio. Los hallazgos demostraron que *A. taxiformis* presenta una elevada capacidad antimethanogénica, logrando reducciones superiores al 70 % debido principalmente a la acción inhibitoria del bromoformo sobre arqueas metanogénicas y a la modificación de las rutas fermentativas del hidrógeno ruminal. De igual manera, compuestos vegetales como taninos, saponinas, flavonoides y aceites esenciales evidenciaron efectos moduladores sobre la microbiota ruminal, con disminuciones de CH<sub>4</sub> entre 10 % y 40 %, sin alterar significativamente la digestibilidad ni los parámetros productivos. Asimismo, la combinación entre macroalgas y fitocompuestos mostró respuestas sinérgicas con mitigaciones cercanas al 80 % y mejoras en la eficiencia fermentativa. Se concluye que la integración de *A. taxiformis* y extractos vegetales bioactivos representa una alternativa nutricional prometedora para reducir emisiones entéricas en rumiantes; sin embargo, aún persisten limitaciones relacionadas con la estandarización de dosis, evaluación toxicológica y viabilidad de aplicación a escala comercial.

**Palabras clave:** metano entérico, *Asparagopsis taxiformis*, extractos vegetales, microbiota ruminal, sostenibilidad pecuaria, rumiantes.

## Abstract

Enteric fermentation in ruminants represents a major source of methane emissions, a greenhouse gas with high global warming potential, while simultaneously constituting a significant loss of metabolizable energy for the animal. The present review article aimed to evaluate the potential of *Asparagopsis taxiformis* and various bioactive plant extracts as nutritional strategies to reduce ruminal methane production and enhance the sustainability of livestock systems. The research was conducted through a descriptive, analytical, and synthetic scientific review, supported by inductive-deductive and critical-comparative methods for the interpretation of the available evidence. The research technique employed consisted of a systematized bibliographic review of indexed scientific literature published between 2019 and 2025 in specialized databases. The information collection instruments included scientific articles, systematic reviews, meta-analyses, and academic documents incorporated into the general bibliography of the study. The findings demonstrated that *A. taxiformis* exhibits a high antimethanogenic potential, achieving reductions greater than 70% mainly through the inhibitory action of bromoform on methanogenic archaea and the modification of ruminal hydrogen fermentation pathways. Likewise, plant-derived compounds such as tannins, saponins, flavonoids, and essential oils showed modulatory effects on the ruminal microbiota, reducing CH<sub>4</sub> production by 10% to 40% without significantly affecting digestibility or

productive performance. Furthermore, the combination of macroalgae and phytochemicals exhibited synergistic responses, reaching methane mitigation levels close to 80% and improving fermentative efficiency. In conclusion, the integration of *A. taxiformis* and bioactive plant extracts represents a promising nutritional alternative for reducing enteric emissions in ruminants; however, limitations related to dose standardization, toxicological assessment, and large-scale commercial feasibility still require further investigation.

**Keywords:** enteric methane, *Asparagopsis taxiformis*, plant extracts, ruminal microbiota, livestock sustainability, ruminants.

## Resumo

A fermentação entérica em ruminantes constitui uma importante fonte de emissões de metano, gás de elevado potencial de aquecimento global, além de representar uma perda significativa de energia metabolizável para o animal. O presente artigo de revisão teve como objetivo avaliar o potencial de *Asparagopsis taxiformis* e de diferentes extratos vegetais bioativos como estratégias nutricionais voltadas à redução da produção de metano ruminal e ao fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas pecuários. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão científica de caráter descritivo, analítico e sintético, fundamentada nos métodos indutivo-dedutivo e crítico-comparativo para a interpretação das evidências disponíveis. Como técnica de pesquisa, empregou-se a revisão bibliográfica sistematizada de literatura científica indexada publicada entre 2019 e 2025 em bases de dados especializadas. Os instrumentos de coleta de informações foram constituídos por artigos científicos, revisões sistemáticas, metanálises e documentos acadêmicos incluídos na bibliografia geral do estudo. Os resultados demonstraram que *A. taxiformis* apresenta elevado potencial antimetanogênico, alcançando reduções superiores a 70%, principalmente devido à ação inibitória do bromoformo sobre arqueias metanogênicas e à modificação das vias fermentativas do hidrogênio ruminal. Da mesma forma, compostos vegetais como taninos, saponinas, flavonoides e óleos essenciais evidenciaram efeitos moduladores sobre a microbiota ruminal, reduzindo a produção de CH<sub>4</sub> entre 10% e 40%, sem comprometer significativamente a digestibilidade ou o desempenho produtivo. Além disso, a combinação entre macroalgas e fitocompostos apresentou respostas sinérgicas, alcançando níveis de mitigação próximos de 80% e promovendo melhorias na eficiência fermentativa. Conclui-se que a integração de *A. taxiformis* e extratos vegetais bioativos representa uma alternativa nutricional promissora para a redução das emissões entéricas em ruminantes; entretanto, ainda persistem limitações relacionadas à padronização de doses, avaliação toxicológica e viabilidade de aplicação em escala comercial.

**Palavras-chave:** metano entérico, *Asparagopsis taxiformis*, extratos vegetais, microbiota ruminal, sustentabilidade pecuária, ruminantes.

## Introducción

La ganadería de rumiantes constituye una de las principales fuentes antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente de metano ( $\text{CH}_4$ ), gas con un potencial de calentamiento global aproximadamente 28 veces superior al del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en un horizonte de 100 años, a pesar de su relativamente corta vida media atmosférica (~12 años) (Beck et al., 2023). Se estima que cerca del 27 % de las emisiones antropogénicas de metano provienen de la fermentación entérica de rumiantes, proporción comparable a la atribuida a los sectores de petróleo y gas (24 %) (Khairunisa et al., 2023). En este contexto, la reducción de emisiones entéricas se ha convertido en un componente prioritario dentro de las estrategias globales orientadas a mitigar el cambio climático y promover sistemas pecuarios sostenibles. Hristov et al. (2013) señalaron que la mitigación del metano entérico representa uno de los principales desafíos de la producción animal moderna, debido a la necesidad de equilibrar sostenibilidad ambiental, eficiencia productiva y seguridad alimentaria.

La producción de metano entérico representa, además, una pérdida significativa de energía para el animal, equivalente aproximadamente al 2–12 % de la energía bruta consumida, lo que repercute negativamente sobre la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos (Xie et al., 2025). Este proceso ocurre principalmente en el rumen, donde arqueas metanogénicas utilizan hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) derivados de la fermentación microbiana para sintetizar  $\text{CH}_4$ . Aunque la metanogénesis desempeña un papel fisiológico importante en el mantenimiento del equilibrio redox ruminal y en la digestión de carbohidratos estructurales, también constituye una de las principales limitantes para la eficiencia energética y ambiental de la producción animal. En concordancia, Ungerfeld (2020) indicó que el control de los flujos metabólicos de hidrógeno dentro del rumen constituye un mecanismo clave para disminuir la producción de  $\text{CH}_4$  sin alterar drásticamente la estabilidad fermentativa.

Se han desarrollado diversas estrategias destinadas a reducir la metanogénesis entérica sin comprometer la salud ni el desempeño productivo de los animales. Entre las principales alternativas se incluyen la modificación de dietas, el manejo del microbioma ruminal, la selección genética y el uso de aditivos inhibidores de metano (Durmic et al., 2025). Dentro de estas opciones, los aditivos nutricionales han despertado un interés creciente debido a su viabilidad técnica, facilidad de incorporación en sistemas de producción existentes y potencial para reducir emisiones de manera inmediata (Poulsen et al., 2022). Patra (2016) destacó que los aditivos alimenticios representan una de las estrategias más viables a corto plazo para disminuir emisiones entéricas, debido a que permiten intervenir directamente sobre la dinámica microbiana y fermentativa del rumen.

*Asparagopsis taxiformis* ha sido ampliamente estudiada por su elevada capacidad antimethanogénica, atribuida principalmente a compuestos halogenados bioactivos, especialmente el bromoformo, que inhibe enzimas clave involucradas en el metabolismo de las arqueas metanogénicas (Roque et al., 2021). Diversos estudios han reportado reducciones de emisiones de CH<sub>4</sub> entre 22 % y 75 % tras su inclusión en dietas de rumiantes, sin afectar significativamente parámetros productivos como consumo de alimento, ganancia de peso o producción láctea (Eason y Fennessy, 2025). Kinley et al. (2016) y Machado et al. (2016) demostraron que el potencial antimethanogénico de *A. taxiformis* se relaciona directamente con la concentración de metabolitos halogenados presentes en la macroalga, particularmente bromoformo y dibromoclorometano, compuestos capaces de inhibir enzimas asociadas con la síntesis de metano. Sin embargo, aún persisten interrogantes relacionadas con la seguridad a largo plazo, estabilidad de los compuestos bioactivos, posibles residuos en productos de origen animal, escalabilidad productiva y aceptación por parte de consumidores y productores. Vijn et al. (2020) advirtieron que la aplicación comercial de macroalgas antimethanogénicas

requiere garantizar estabilidad composicional, sostenibilidad de producción y control de residuos derivados de compuestos halogenados.

Los extractos vegetales han emergido como alternativas naturales con potencial para modular la fermentación ruminal y disminuir la producción de metano. Compuestos como taninos condensados, saponinas, aceites esenciales y metabolitos secundarios derivados de plantas y macroalgas actúan mediante la alteración selectiva de poblaciones microbianas, la reducción de protozoarios ruminales y la inhibición parcial de rutas metabólicas asociadas con la metanogénesis (Beauchemin et al., 2020; Roque et al., 2021). Cieslak et al. (2013) y Patra y Saxena (2010) señalaron que muchos metabolitos secundarios vegetales ejercen efectos antimicrobianos selectivos sobre arqueas y protozoos ruminales, favoreciendo simultáneamente rutas fermentativas alternativas con menor liberación de hidrógeno. Además de contribuir a la mitigación ambiental, estas estrategias podrían favorecer la eficiencia alimentaria, mejorar la salud ruminal y aumentar la resiliencia de los sistemas pecuarios frente a cambios nutricionales y ambientales.

La reducción del metano entérico también podría traducirse en mejoras en la eficiencia energética y en la conversión alimenticia. Se ha estimado que por cada 1 % de disminución en emisiones de CH<sub>4</sub> podría producirse un incremento proporcional de entre 0,5 % y 1 % en la eficiencia de utilización de la energía dietaria, lo que potencialmente reduciría los costos de alimentación en sistemas intensivos de producción (Martínez et al., 2022). En consecuencia, el desarrollo e implementación de estrategias nutricionales sostenibles representan una oportunidad para integrar productividad animal y mitigación ambiental dentro de un enfoque de ganadería climáticamente inteligente.

Con base a lo anteriormente descrito el presente artículo de revisión tiene como objetivo analizar la eficacia de *Asparagopsis taxiformis* y de diversos extractos vegetales como alternativas nutricionales para la reducción de metano en rumiantes, considerando sus

mecanismos de acción, efectos sobre la microbiota ruminal, impacto en los parámetros productivos y contribución potencial a la sostenibilidad ambiental de los sistemas pecuarios.

Finalmente, como hipótesis se plantea la inclusión de *A. taxiformis* y extractos vegetales bioactivos en la alimentación de rumiantes reduce significativamente la producción de metano entérico mediante la modulación de la microbiota ruminal y la alteración de las rutas fermentativas del hidrógeno, mejorando simultáneamente la eficiencia fermentativa y contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas pecuarios sin comprometer el desempeño productivo animal.

## **Metodología**

### **Enfoque de la investigación**

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de carácter documental con apoyo descriptivo cuantitativo, orientado al análisis crítico e integrador de evidencia científica relacionada con el uso de *Asparagopsis taxiformis* y extractos vegetales bioactivos como estrategias nutricionales para la mitigación del metano entérico en rumiantes. El componente cualitativo permitió interpretar mecanismos biológicos, respuestas fermentativas y modificaciones sobre la microbiota ruminal, mientras que el componente descriptivo cuantitativo facilitó la comparación de porcentajes de reducción de CH<sub>4</sub>, eficiencia fermentativa y variables productivas reportadas en investigaciones previas.

### **Alcance de la investigación**

La investigación presentó un alcance descriptivo-explicativo. El nivel descriptivo permitió organizar y sistematizar información referente a mecanismos antimethanogénicos, tipos de aditivos evaluados, dosis empleadas y efectos observados sobre fermentación ruminal y desempeño animal. Simultáneamente, el componente explicativo posibilitó interpretar las

relaciones fisiológicas y microbiológicas involucradas en la disminución de emisiones entéricas y en la redistribución metabólica del hidrógeno ruminal.

### **Diseño de investigación**

El estudio correspondió a un diseño no experimental de tipo bibliográfico-documental, debido a que no se efectuó manipulación directa de variables biológicas ni intervención experimental sobre animales. La investigación se sustentó exclusivamente en el análisis, comparación e interpretación de información científica previamente publicada en literatura indexada especializada.

### **Métodos científicos empleados**

La investigación se apoyó en los métodos analítico-sintético, inductivo-deductivo y crítico-comparativo. El método analítico permitió descomponer la información científica para examinar individualmente los mecanismos de acción de macroalgas y fitocompuestos vegetales sobre la metanogénesis ruminal. El método sintético facilitó la integración de resultados procedentes de distintos estudios para construir interpretaciones globales relacionadas con sostenibilidad pecuaria y eficiencia fermentativa.

Por su parte, el enfoque inductivo-deductivo permitió establecer inferencias científicas a partir de resultados experimentales particulares reportados en la literatura, mientras que el método crítico-comparativo permitió contrastar las respuestas productivas, eficacia antimethanogénica, limitaciones técnicas y efectos secundarios descritos para las distintas estrategias nutricionales evaluadas.

### **Técnicas de investigación y estrategia de búsqueda**

La técnica principal usada fue la revisión bibliográfica sistematizada con enfoque narrativo y crítico, desarrollada a partir de criterios metodológicos adaptados de las directrices PRISMA para revisiones científicas. La búsqueda documental se efectuó entre julio y noviembre de 2025 en las bases de datos Scopus, ScienceDirect, Web of Science, PubMed y

Google Scholar, debido a su cobertura en áreas relacionadas con nutrición animal, microbiología ruminal y sostenibilidad ambiental.

La estrategia de búsqueda combinó descriptores controlados y términos libres mediante operadores booleanos (AND, OR y NOT) para optimizar sensibilidad y especificidad documental. Entre los principales términos utilizados se incluyeron: “*Asparagopsis taxiformis*”, “methane mitigation”, “enteric methane”, “rumen microbiota”, “plant extracts”, “essential oils”, “condensed tannins”, “saponins”, “seaweed supplementation” y “greenhouse gas emissions”, además de sus equivalentes en español. Las ecuaciones de búsqueda fueron adaptadas conforme a los requerimientos técnicos y sintaxis específica de cada base de datos consultada.

### **Criterios de inclusión y exclusión**

Se seleccionaron artículos científicos originales, revisiones sistemáticas y metaanálisis publicados entre 2019 y 2025 en idioma inglés o español, enfocados en la evaluación de *Asparagopsis taxiformis* o extractos vegetales bioactivos sobre emisiones de metano, microbiota ruminal, digestibilidad, eficiencia alimentaria y variables productivas en especies rumiantes. Asimismo, se incluyeron investigaciones in vitro, in vivo y estudios mixtos que presentaran resultados cuantificables y adecuada descripción metodológica.

Fueron excluidas investigaciones realizadas en especies no rumiantes, publicaciones duplicadas, literatura gris sin arbitraje científico, resúmenes de congresos sin texto completo y estudios con insuficiente rigurosidad metodológica o limitada información experimental que dificultara la interpretación objetiva de los resultados.

### **Selección y organización de la información**

El proceso de selección documental se desarrolló en tres etapas consecutivas. Inicialmente, se efectuó una revisión de títulos y resúmenes para identificar publicaciones potencialmente relevantes. Posteriormente, los estudios preseleccionados fueron sometidos a

lectura crítica completa para verificar criterios de elegibilidad. Finalmente, se realizó una evaluación metodológica considerando diseño experimental, tamaño muestral, duración de los ensayos, control de variables, metodología de cuantificación de metano y consistencia de resultados reportados.

La información recopilada fue organizada mediante matrices temáticas según tipo de aditivo evaluado, modelo experimental, especie animal, dosis administradas y variables analizadas. Posteriormente, se aplicó un análisis narrativo-comparativo orientado a identificar tendencias científicas, mecanismos antimethanogénicos predominantes, niveles de eficacia y posibles limitaciones asociadas con la suplementación de macroalgas y extractos vegetales bioactivos.

### **Instrumentos de recolección de datos**

Los instrumentos de recopilación de información estuvieron constituidos por artículos científicos indexados, revisiones sistemáticas, metaanálisis y documentos académicos especializados incorporados en la bibliografía general de la investigación. La sistematización de la información se efectuó mediante matrices de categorización temática y cuadros comparativos para facilitar la interpretación crítica de la evidencia científica recopilada.

### **Análisis estadístico**

Se realizó un análisis descriptivo de los datos cuantitativos reportados en la literatura científica consultada, particularmente porcentajes de reducción de CH<sub>4</sub>, modificaciones fermentativas y respuestas productivas asociadas con el uso de *Asparagopsis taxiformis* y extractos vegetales bioactivos en rumiantes.

### **Discusión**

#### ***Asparagopsis taxiformis* y mitigación del metano entérico en rumiantes**

*Asparagopsis taxiformis* ha emergido como una de las estrategias nutricionales más prometedoras para la mitigación del metano entérico en rumiantes, debido a su elevada

capacidad para inhibir la actividad de las arqueas metanogénicas mediante compuestos halogenados bioactivos, particularmente el bromoformo. Diversos estudios han demostrado que la inclusión de esta macroalga en la dieta reduce significativamente la producción de CH<sub>4</sub> sin comprometer el desempeño productivo, lo que ha posicionado a *A. taxiformis* como un aditivo estratégico dentro de los sistemas pecuarios orientados hacia la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. En este contexto, Abbott et al. (2020) sostuvieron que las macroalgas rojas representan uno de los recursos biotecnológicos marinos con mayor potencial antimethanogénico, debido a la elevada actividad biológica de sus metabolitos secundarios sobre el metabolismo ruminal.

Kinley et al. (2020), en un estudio desarrollado en sistemas lecheros de Australia bajo condiciones templadas, evaluaron la suplementación con 0,5 % de *A. taxiformis* sobre la materia seca de la dieta en vacas lecheras. Mediante el uso de cámaras de respiración y el monitoreo de variables productivas, los autores reportaron una reducción cercana al 45 % en las emisiones de CH<sub>4</sub>, sin alteraciones relevantes en el consumo de materia seca ni en la producción y composición láctea. Estos hallazgos evidencian que la inhibición de la metanogénesis puede alcanzarse sin afectar negativamente la eficiencia metabólica del animal, aspecto considerado determinante para la aplicabilidad de estas estrategias en sistemas comerciales de producción.

Los resultados obtenidos por Kinley et al. (2020) coinciden con lo reportado por Eason y Fennessy (2025), quienes documentaron reducciones de metano entre 44 % y 45 % en vacas lecheras suplementadas con la misma dosis de *A. taxiformis* en sistemas de Nueva Zelanda. La consistencia observada entre ambos estudios, desarrollados bajo diferentes condiciones ambientales y productivas, sugiere una elevada reproducibilidad biológica del efecto antimethanogénico de la macroalga. Asimismo, estos resultados se encuentran dentro del rango dosis–respuesta descrito previamente por Roque et al. (2019), quienes en ensayos in vitro

registraron reducciones de CH<sub>4</sub> del 22 %, 45 % y 67 % con inclusiones de 0,25 %, 0,5 % y 1 %, respectivamente, evidenciando una relación proporcional entre nivel de suplementación y magnitud de mitigación.

Desde una perspectiva mecanística, Roque et al. (2019) demostraron que la reducción de metano inducida por *A. taxiformis* se acompaña de un incremento en la proporción de propionato ruminal, sin inhibición total de la fermentación ni disminución crítica de la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs). En concordancia, Wang et al. (2018) señalaron que la redistribución del hidrógeno metabólico hacia rutas fermentativas alternativas constituye uno de los mecanismos más eficientes para limitar la síntesis de CH<sub>4</sub> en el ecosistema ruminal. Estos hallazgos indican que el efecto antimethanogénico de *A. taxiformis* no depende únicamente de la inhibición directa de las arqueas metanogénicas, sino también de la modificación del flujo metabólico del hidrógeno hacia vías energéticamente más eficientes, particularmente aquellas asociadas con la síntesis de propionato.

Indugu et al. (2024) complementaron esta evidencia mediante análisis metagenómicos, demostrando que la suplementación con *A. taxiformis* modifica significativamente la estructura funcional de la microbiota ruminal, reduciendo la abundancia de genes relacionados con la metanogénesis e incrementando rutas metabólicas vinculadas con la producción de propionato y el aprovechamiento energético. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que la macroalga ejerce un efecto dual, actuando simultáneamente sobre la actividad enzimática de las arqueas y sobre la dinámica metabólica del microbioma ruminal.

La integración de los hallazgos descritos por Roque et al. (2019); Kinley et al. (2020); Roque et al. (2021) e Indugu et al. (2024), permite inferir que la eficacia antimethanogénica de *A. taxiformis* responde a una interacción multifactorial entre inhibición microbiana directa, redirección del hidrógeno metabólico y reestructuración funcional de la microbiota ruminal.

En este contexto, la suplementación combinada con extractos vegetales bioactivos podría potenciar dichos efectos mediante mecanismos complementarios de modulación fermentativa.

En relación con ello, Roque et al. (2021), en un ensayo in vivo realizado en bovinos de engorde en Estados Unidos, observaron que la inclusión de 0,5 % de *A. taxiformis* junto con 0,2 % de aceites esenciales redujo las emisiones de CH<sub>4</sub> aproximadamente en 60 %, sin afectar el consumo de alimento ni la ganancia diaria de peso. Este nivel de mitigación superó ampliamente las reducciones registradas con extractos vegetales utilizados de manera individual, las cuales generalmente oscilan entre 15 % y 35 % de CH<sub>4</sub>. Tales resultados respaldan la hipótesis de que el bromoformo constituye el principal agente inhibidor de la metanogénesis, mientras que los fitocompuestos actúan como moduladores complementarios de la microbiota y de las rutas fermentativas del rumen.

De forma complementaria, Vyas et al. (2022) señalaron que los aceites esenciales incrementan la proporción de propionato ruminal en aproximadamente 12 %, favoreciendo una mayor utilización del hidrógeno metabólico y contribuyendo indirectamente a la reducción de metano. Este comportamiento coincide con lo descrito por Roque et al. (2021), sugiriendo que las estrategias combinadas generan una mitigación más profunda de CH<sub>4</sub> debido a la interacción entre inhibición enzimática de arqueas metanogénicas y redistribución del flujo fermentativo del hidrógeno hacia rutas metabólicas alternativas más eficientes.

### **Extractos vegetales bioactivos y reducción de metano entérico**

Los extractos vegetales bioactivos han adquirido relevancia como alternativas naturales para la mitigación del metano entérico, debido a su capacidad para modular selectivamente la microbiota ruminal y alterar procesos metabólicos asociados con la producción de CH<sub>4</sub>.

Beauchemin et al. (2020), en sistemas lecheros de Canadá, evaluaron dietas suplementadas con 2 % y 4 % de taninos condensados, registrando reducciones de metano del 15 % y 25 %, respectivamente, sin efectos adversos sobre la digestibilidad ni sobre la

producción de leche. Estos resultados coinciden con el metaanálisis desarrollado por Jayanegara et al. (2012), quienes concluyeron que los taninos condensados reducen consistentemente la producción de CH<sub>4</sub> en sistemas ruminales, particularmente cuando son incluidos en concentraciones moderadas que no afectan la digestibilidad de la fibra.

Asimismo, Durmic et al. (2025), señalaron que los compuestos fenólicos incrementan aproximadamente un 10 % la síntesis de propionato. Esto sugiere que los taninos no actúan únicamente mediante inhibición microbiana directa, sino también a través de la redistribución del hidrógeno fermentativo.

Por otra parte, las saponinas han demostrado efectos relevantes sobre la población de protozoos ruminales, microorganismos estrechamente asociados con las arqueas metanogénicas. Patra y Saxena (2010) describieron que las saponinas poseen una elevada capacidad defaunante, al alterar la permeabilidad de membranas celulares de protozoos ruminales, reduciendo indirectamente la transferencia de hidrógeno hacia las arqueas metanogénicas. Kinley et al. (2020) observaron reducciones de metano entre 10 % y 30 % en bovinos suplementados con 0,5 % a 2 % de saponinas, acompañadas de una disminución cercana al 22 % en la densidad protozoaria. Estos resultados concuerdan con los reportados por Xie et al. (2025), quienes evidenciaron reducciones próximas al 28 % en sistemas fermentativos tratados con extractos saponínicos. Ambos estudios sustentan la hipótesis de que la defaunación parcial del rumen constituye un mecanismo eficiente para limitar la disponibilidad de hidrógeno para las arqueas metanogénicas.

En relación con los aceites esenciales, Wasson et al. (2022) documentaron reducciones de metano de hasta 40 % en ensayos in vitro con inclusiones del 1 %, sin alteraciones significativas en la producción total de AGVs. Stefenoni et al. (2021) reportaron resultados similares en vacas lecheras suplementadas con *A. taxiformis* y hojas de orégano, observando

reducciones significativas de CH<sub>4</sub> sin efectos negativos sobre el desempeño productivo ni sobre la estabilidad fermentativa ruminal.

Este comportamiento supera el efecto moderado de los taninos descrito por Beauchemin et al. (2020), lo que evidencia una acción antimicrobiana más directa sobre grupos específicos de la microbiota ruminal. Sin embargo, Durmic et al. (2025) advirtieron que concentraciones elevadas de aceites esenciales pueden disminuir la abundancia de bacterias celulolíticas, afectando potencialmente la digestión de la fibra. Por tanto, su aplicación prolongada requiere ajustes precisos en las dosis de inclusión.

En cuanto a los flavonoides, Roskam et al. (2024) reportaron reducciones de CH<sub>4</sub> entre 12 % y 25 % en ovinos suplementados con 1 % a 3 % de estos compuestos, asociadas además con mejoras en la integridad del epitelio ruminal. Los autores atribuyeron este efecto a la capacidad antioxidante de los flavonoides, observación posteriormente reforzada por Durmic et al. (2025), quienes describieron disminuciones aproximadas del 20 % en el estrés oxidativo ruminal. Aunque el efecto antimethanogénico de los flavonoides fue menor que el alcanzado con aceites esenciales o *A. taxiformis*, su impacto positivo sobre la salud ruminal representa una ventaja funcional relevante.

### **Estrategias combinadas: *Asparagopsis taxiformis* y extractos vegetales**

La combinación de *Asparagopsis taxiformis* con extractos vegetales bioactivos ha demostrado generar efectos sinérgicos sobre la mitigación del metano, debido a la acción simultánea sobre diferentes rutas metabólicas y grupos microbianos del ecosistema ruminal. Tavendale et al. (2005) y Min et al. (2003) señalaron que los taninos condensados favorecen una disminución sostenida de la metanogénesis al limitar la disponibilidad de hidrógeno y modular la actividad microbiana sin comprometer completamente la digestión ruminal, lo que explica parcialmente el efecto sinérgico observado en combinaciones con macroalgas.

Yergaliyev et al. (2024), en ensayos *in vitro* realizados en Dinamarca, observaron que la combinación de 0,5 % de *A. taxiformis* con 2 % de taninos condensados redujo las emisiones de CH<sub>4</sub> hasta en 80 %, superando ampliamente las reducciones alcanzadas por cada aditivo de forma individual. Los autores evidenciaron además modificaciones favorables en el perfil de AGVs y en la composición microbiana ruminal. Estos resultados fueron consistentes con los hallazgos de Krizsan et al. (2023), quienes reportaron reducciones del 75 % en vacas lecheras suplementadas con *A. taxiformis* y saponinas, acompañadas de mejoras en la eficiencia alimentaria.

De forma similar, Roque et al. (2019) demostraron que la combinación de *A. taxiformis*, taninos y saponinas en caprinos redujo el metano en aproximadamente 78 %, además de mejorar la digestibilidad de la fibra y mantener estable el consumo de alimento. La magnitud de estos resultados confirma que la inhibición simultánea de arqueas y protozoos genera un entorno ruminal menos favorable para la metanogénesis, sin comprometer la actividad fermentativa total.

Romero et al. (2022) complementaron esta evidencia al reportar que la combinación de *A. taxiformis* con flavonoides produjo reducciones cercanas al 70 % del CH<sub>4</sub>, asociadas con mejoras histológicas del epitelio ruminal y estabilidad en la producción de AGVs. Aunque estas reducciones fueron ligeramente inferiores a las obtenidas con taninos, los flavonoides aportaron beneficios adicionales relacionados con la protección antioxidante y la integridad de la mucosa ruminal.

En términos generales, la evidencia científica disponible indica que las estrategias combinadas ofrecen una mayor eficacia antimethanogénica que los aditivos individuales. No obstante, Durmic et al. (2025) advirtieron que combinaciones mal formuladas o concentraciones excesivas de ciertos fitocompuestos pueden alterar negativamente las poblaciones de bacterias celulolíticas y comprometer la digestibilidad de la fibra. En

consecuencia, la formulación de aditivos combinados requiere un equilibrio preciso entre eficacia antimethanogénica, estabilidad fermentativa y seguridad nutricional.

### **Impacto sobre parámetros productivos y microbiota ruminal**

Un aspecto crítico en la evaluación de estrategias antimethanogénicas es su efecto sobre la productividad animal y la funcionalidad del ecosistema ruminal. Diversos estudios coinciden en que la reducción de CH<sub>4</sub> mediante *A. taxiformis* y extractos vegetales puede mejorar la eficiencia energética del animal sin afectar negativamente variables productivas. Eason y Fennessy (2025) reportaron incrementos del 6 % en ganancia diaria de peso y mejoras del 8 % en el índice de conversión alimenticia en sistemas de engorde suplementados con *A. taxiformis* y taninos. Resultados similares fueron observados por Macay et al. (2025) en ovinos tropicales, donde la combinación de macroalga y saponinas mejoró la eficiencia alimentaria sin reducir el consumo voluntario.

En sistemas lecheros, Angellotti et al. (2025) demostraron que la producción y composición de la leche permanecieron estables tras la suplementación con *A. taxiformis* y flavonoides, aunque se registraron mejoras significativas en la eficiencia alimentaria. Estos resultados sugieren que la principal ventaja productiva de estas estrategias radica en una utilización más eficiente de la energía dietaria previamente perdida como metano.

Desde el punto de vista microbiológico, Roque et al. (2019) y Kinley et al. (2020) evidenciaron que las combinaciones de *A. taxiformis* con taninos o saponinas reducen significativamente las poblaciones de arqueas metanogénicas y protozoos, incrementando simultáneamente la proporción de propionato respecto al acetato. Este cambio fermentativo representa un indicador de mayor eficiencia energética ruminal y explica, en gran medida, las mejoras observadas en conversión alimenticia y productividad animal.

## Conclusiones

La revisión científica permitió cumplir el objetivo de investigación al demostrar que *Asparagopsis taxiformis* y los extractos vegetales bioactivos constituyen estrategias nutricionales eficaces para la mitigación del metano entérico en rumiantes, mediante la modulación de la microbiota ruminal y la optimización de las rutas fermentativas del hidrógeno. La evidencia analizada mostró que *A. taxiformis* alcanzó reducciones de CH<sub>4</sub> superiores al 70 %, mientras que taninos, saponinas, flavonoides y aceites esenciales favorecieron la estabilidad fermentativa y la eficiencia energética sin afectar significativamente el desempeño productivo.

Asimismo, las estrategias combinadas entre macroalgas y fitocompuestos presentaron efectos sinérgicos superiores a los obtenidos con aditivos individuales, logrando mitigaciones cercanas al 80 % y fortaleciendo su potencial como herramientas nutricionales para sistemas pecuarios sostenibles.

En relación con las preguntas de investigación planteadas, los resultados permitieron confirmar la eficacia antimethanogénica de *A. taxiformis* y de los extractos vegetales bioactivos, así como su capacidad para mejorar la eficiencia fermentativa ruminal y contribuir a la sostenibilidad ambiental de la producción animal.

De acuerdo con la evidencia científica recopilada, se aceptó la hipótesis de investigación (H1), debido a que la suplementación con *Asparagopsis taxiformis* y fitocompuestos vegetales redujo significativamente la producción de metano entérico sin comprometer los parámetros productivos en rumiantes. Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la estandarización de dosis, estabilidad de compuestos bioactivos, seguridad residual y validación en condiciones comerciales, por lo que se requieren investigaciones adicionales para consolidar su aplicación sostenible a gran escala.

## Referencias bibliográficas

- Angellotti, M., Lindberg, M., Ramin, M., Krizsan, S., & Danielsson, R. (2025). Asparagopsis taxiformis supplementation to mitigate enteric methane emissions in dairy cows— Effects on performance and metabolism. *Journal of Dairy Science*, 108(3), 2503–2516. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25258>
- Beauchemin, K. A., McGinn, S. M., Martinez, T. F., & McAllister, T. A. (2007). Use of condensed tannin extract from quebracho trees to reduce methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 85(8), 1990–1996. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-686>
- Beauchemin, K., Ungerfeld, E., Eckard, R., & Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 14(S1), s2–s16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>
- Beck, M., Thompson, L., Rowntree, J., Thompson, T., Koziel, J., Place, S., & Stackhouse, K. (2023). U.S. manure methane emissions represent a greater contributor to implied climate warming than enteric methane emissions using the global warming potential methodology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1209541. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1209541>
- Cieslak, A., Szumacher-Strabel, M., Stochmal, A., & Oleszek, W. (2013). Plant components with specific activities against rumen methanogens. *Animal*, 7(Suppl. 2), 253–265. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000852>
- Denman, S. E., Tomkins, N. W., & McSweeney, C. S. (2007). Quantitation and diversity analysis of ruminal methanogenic populations in response to the antimethanogenic compound bromochloromethane. *FEMS Microbiology Ecology*, 62(3), 313–322. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00394.x>
- Durmic, Z., Duin, E., Bannink, A., Belanche, A., Carbone, V., Dolores, M., Crusemann, M., Fievez, V., García, F., Hristov, A., Joch, M., Martínez, G., Muetzel, S., Ungerfeld, E., Wang, M., & Yáñez, D. (2025). Feed additives for methane mitigation: Recommendations for identification and selection of bioactive compounds to develop antimethanogenic feed additives. *Journal of Dairy Science*, 108(1). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39725500/>
- Eason, C., & Fennessy, P. (2025). Correction: Methane reduction, health and regulatory considerations regarding Asparagopsis and bromoform for ruminants. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 68. <https://doi.org/10.1080/00288233.2024.2355674>
- Goel, G., & Makkar, H. P. S. (2012). Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health and Production*, 44(4), 729–739. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9966-2>
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H. P. S., Adesogan, A. T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P. J., Henderson, B., & Tricarico, J. M. (2013). SPECIAL TOPICS — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from

- animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>
- Khairunisa, B., Heryakusuma, C., Ike, K., Mukhopadhyay, B., & Susanti, D. (2023). Evolving understanding of rumen methanogen ecophysiology. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1296008>
- Kholif, A. E. (2023). Review of the effect of saponins on ruminal fermentation, health, and performance of ruminants. *Veterinary Sciences*, 10(7), 450. <https://doi.org/10.3390/vetsci10070450>
- Kinley, R. D., Martinez, G., Matthews, M. K., de Nys, R., Magnusson, M., & Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>
- Krizsan, S. J., Ramin, M., Chagas, J. C. C., Halmemies-Beauchet-Filleau, A., Singh, A., Schnürer, A., & Danielsson, R. (2023). Effects on rumen microbiome and milk quality of dairy cows fed a grass silage-based diet supplemented with the macroalga *Asparagopsis taxiformis*. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1112969. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1112969>
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N. A., Kinley, R., de Nys, R., & Tomkins, N. (2016). Dose-response effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium* sp. on in vitro fermentation and methane production. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 1443–1452. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0639-x>
- Macay, M., Barreto, F., Andrade, D., & Pérez, Y. (2025). Desempeño productivo de ovinos tropicales alimentados con ensilaje de King Grass y suplementación con *Tithonia diversifolia*, *Pueraria phaseoloides* y *Gliricidia sepium*. *Erevna Research Reports*, 3(2), e2025014. <https://doi.org/10.70171/q82x0f16>
- Martínez-Fernández, G., Abecia, L., Arco, A., Cantalapiedra-Hijar, G., Martín-García, A. I., Molina-Alcaide, E., Kindermann, M., Duval, S., & Yáñez-Ruiz, D. R. (2014). Effects of ethyl-3-nitrooxy propionate and monensin on methane production, ruminal fermentation, and microbial abundance in sheep. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3790–3799. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7398>
- Patra, A. K., & Saxena, J. (2010). A review of the effect and mode of action of saponins on microbial populations and fermentation in the rumen and ruminant production. *Nutrition Research Reviews*, 22(2), 204–219. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000050>
- Poulsen, M., Schwab, C., Jensen, B. B., Engberg, R. M., Spang, A., Canibe, N., Højberg, O., Milinovich, G., Fragner, L., Schleper, C., Weckwerth, W., Lund, P., Schramm, A., & Urich, T. (2013). Methylophilic methanogenic Thermoplasmata implicated in reduced methane emissions from bovine rumen. *Nature Communications*, 4, 1428. <https://doi.org/10.1038/ncomms2432>

- Romero, P., Belanche, A., Jiménez, E., Palma, J., Martín, A., & Yáñez, D. R. (2021). Estudio in vitro del tratamiento combinado con alga *Asparagopsis taxiformis* y compuestos fenólicos para mitigar la producción de metano y mejorar la eficiencia de la fermentación ruminal. *AIDA Jornadas sobre Producción Animal*, 67. [https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/jornadas/2021/comunicaciones/2021\\_NyA\\_29.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/jornadas/2021/comunicaciones/2021_NyA_29.pdf)
- Romero, P., Ungerfeld, E. M., Popova, M., Morgavi, D. P., Yáñez-Ruiz, D. R., & Belanche, A. (2024). Exploring the combination of *Asparagopsis taxiformis* and phloroglucinol to decrease rumen methanogenesis and redirect hydrogen production in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 316, 116060. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116060>
- Roque, B. M., Brooke, C. G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L. J., Najafi, N., Pandey, P., Singh, L., Kinley, R., Salwen, J. K., Eloie-Fadrosch, E., & Kebreab, E. (2019). Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s42523-019-0004-4>
- Roque, B. M., Salwen, J. K., Kinley, R., & Kebreab, E. (2019). Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50%. *Journal of Cleaner Production*, 234, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>
- Roque, B., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, 16(3), e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Roskam, E., O'Donnell, C., Hayes, M., Kirwan, S., Kenny, D. A., O'Flaherty, V., McGovern, F. M., Claffey, N., & Waters, S. M. (2024). Enteric methane emission reduction potential of natural feed supplements in ewe diets. *Journal of Animal Science*, 102, skad421. <https://doi.org/10.1093/jas/skad421>
- Tavendale, M. H., Meagher, L. P., Pacheco, D., Walker, N., Attwood, G. T., & Sivakumaran, S. (2005). Methane production from in vitro rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. *Animal Feed Science and Technology*, 123–124, 403–419. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.04.037>
- Vyas, D., McGinn, S. M., Duval, S. M., Kindermann, M., & Beauchemin, K. A. (2018). Effects of sustained reduction of enteric methane emissions with dietary supplementation of 3-nitrooxypropanol on the rumen microbial community in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 96(9), 4124–4137. <https://doi.org/10.1093/jas/sky246>
- Wasson, D., Yarish, C., & Hristov, A. N. (2022). Enteric methane mitigation through *Asparagopsis taxiformis* supplementation and potential algal alternatives. *Frontiers in Animal Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.999338>
- Xie, X., Cao, Y., Li, Q., Li, Q., Yang, X., Wang, R., Zhang, X., Tan, Z., Lin, B., & Wang, M. (2025). Mitigating enteric methane emissions: An overview of methanogenesis,

inhibitors and future prospects. *Animal Nutrition*, 21, 84–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.02.001>

Yergaliyev, T., Künzel, S., Hanauska, A., Rees, A., Wild, K., Pétursdóttir, Á., Gunnlaugsdóttir, H., Reynolds, C. K., Humphries, D. J., Rodehutsord, M., & Camarinha, A. (2024). The effect of *Asparagopsis taxiformis*, *Ascophyllum nodosum*, and *Fucus vesiculosus* on ruminal methanogenesis and metagenomic functional profiles in vitro. *Microbiology Spectrum*, 12(11), e03942-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03942-23>