

Alternativas nutricionales para disminuir emisiones de gas metano por bovinos y su efecto en el calentamiento global

Nutritional alternatives to reduce methane gas emissions by cattle and their effect on global warming

Nazly Yolieth Martin¹, Germán de Jesús Rojas¹, Nelson E. Arenas¹ y Víctor Herrera-Franco^{2*}

Resumen

La interacción entre los factores de producción animal y el impacto ambiental causado por las diversas actividades ganaderas han sido asociadas con cambios climáticos. Los rumiantes debido a su proceso digestivo de fermentación entérica son reconocidos como importante fuente de emisión de metano a la atmosfera. La producción de este gas varía en función de la alimentación reflejando ineficiencias en la producción animal. Así, los productos de la fermentación ruminal (CH₄ y AGCC) producidos por la microbiota ruminal podrían maximizar la asimilación de nutrientes y la disminución de las emisiones de metano en bovinos. En esta revisión se describe el aporte de diferentes dietas con materias primas no convencionales y su efecto en parámetros de fermentación y microbiología ruminal.

Palabras clave: microbiota, ácidos grasos de cadena corta, bovinos, nutrición.

Abstract

Interaction between factors altering animal production and the environmental impact caused by livestock industry has been associated with climate change. Ruminants are a major source of methane emissions to the atmosphere due enteric fermentation during digestive process. Gas production is influenced by animal feeding and results in lack of efficiency in animal production. Thus, products of rumen fermentation (CH₄ and AGCC) are produced by the ruminal microbiota which might increase nutrient assimilation and decrease methane emissions from cattle. In this review, we described several diets with non-conventional raw materials and discuss its effect on fermentation constraints and ruminal microbiology.

Keywords: Short chain fatty acids, cattle, microorganisms, nutrition

Introducción

La actividad ganadera es una de las más importantes a nivel global, pero la tercera con más efectos adversos contaminantes sobre el medio ambiente, ya que constituye una de las principales fuentes de contaminación terrestre (1). La fermentación de los carbohidratos por los rumiantes es un proceso que resulta en diferentes ácidos grasos de cadena corta (AGCC) incluyendo ácido acético, propiónico y butírico. También, productos secundarios como calor, gas metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), los cuales representan pérdidas de energía al animal, estimada en 2 a 12% de la energía bruta del alimento (2). Un rumiante adulto puede producir hasta 17 litros de metano por hora y este gas no puede ser metabolizado por el animal ni por la microbiota ruminal siendo la mayor parte removido del rumen por eructación y liberado en el medio ambiente (3).

La producción de CH₄ por rumiantes ha sido objeto de debate y respecto a la contribución de este un gas asociado al fenómeno de efecto invernadero. Así, CH₄ representa un potencial contribuyente de calentamiento global cerca de 23 veces mayor que el dióxido de carbono (4). Estudios con

rumiantes sugieren que la emisión de CH₄ depende de la cantidad del alimento ingerido y de la calidad de la dieta (5;6). De esta manera, los parámetros para la reducción de las emisiones de metano en sistemas de producción animal están ligados al manejo alimenticio y a las estrategias nutricionales (5;6). Se comprende que el conocimiento de los procesos nutricionales de los rumiantes y de la composición de gases emitidos a la atmosfera es fundamental para buscar sistemas productivos más eficientes. De esta forma, las estrategias alimenticias que reducen la emisión de CH₄ podrían traer beneficios no solamente al medio ambiente, sino también al propio rumiante. La presente revisión tiene como objetivo realizar una revisión de literatura sobre alternativas nutricionales y su efecto sobre la disminución de emisiones de gas metano por bovinos, además de parámetros de fermentación y microbiología ruminal.

Criterios para búsqueda de información desde bases de datos

Se empleó la declaración de prisma para la realización de esta revisión (Urrutia y Bonfill, 2010). Se seleccionó información relacionada con la cinética ruminal, microorganismos

¹ Programa de Zootecnia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca Sede Fusagasugá (Colombia).

² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

* Autor de Correspondencia: Víctor Herrera-Franco, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Correo: vhherrerafranco@gmail.com

ruminales y las vías metabólicas involucradas en la formación de metano. Artículos científicos relacionados con el impacto ambiental de la producción de metano por bovinos. Se revisaron publicaciones relacionadas con las alternativas nutricionales que disminuyen las emisiones de metano como son; el concentrado, los forrajes mejorados genéticamente, los lípidos, el glicerol, los nitritos y nitratos, los ionóforos y los aceites esenciales (AE).

Se incluyeron en la revisión publicaciones científicas, revisiones e informes. La búsqueda de información se realizó en las siguientes bases de datos: ScienceDirect, Scopus y scielo. Las palabras claves incluídas fueron; para la palabra metano (methane) AND/OR calentamiento global (global warming) AND/OR emisiones de metano por bovinos (emission of methane produced by cattle), inclusión de carbohidratos altamente fermentables en bovinos (inclusion of Highly fermentable carbohydrates in cattle) AND/OR inclusión de lípidos en bovinos (inclusion of lipids in cattle) inclusión de glicerol en bovinos (inclusion of glycerol in cattle) AND/OR inclusión de nitritos y nitratos en bovinos (inclusion of nitrites and nitrates in cattle) AND/OR inclusión de ionóforos en bovinos (Inclusion of ionophores in cattle) AND/OR inclusión de aceites esenciales en bovinos (inclusion of essential oils in cattle) AND/OR propiedades nutricionales de los forrajes genéticamente mejorados (nutritional properties of genetically enhanced forages). Se descartaron proyectos de pregrado, capítulos de libros, resúmenes de conferencias, leyes y decretos (Figura 1).

Calentamiento global

El calentamiento del planeta se produce cuando los rayos solares que no pueden reflejarse hacia el espacio exterior penetran la atmosfera y llegan a la superficie terrestre promoviendo que la radiación de onda larga quede atrapada en la atmosfera incrementando así la temperatura

del planeta (7). Ello ocurre porque diferentes gases que impiden la disipación de dicha radiación se acumulan en la atmosfera, algunos de los gases de efecto invernadero de mayor atención en orden de relevancia son: CO₂, CH₄ y N₂O (8). El calentamiento global afecta la sostenibilidad ambiental y afecta las temperaturas con fluctuaciones térmicas drásticas asociadas por la actividad humana. Dichos cambios han generado cambios notorios en el planeta en los últimos años; estimándose que la temperatura terrestre ha incrementado entre los años 1850 y 2010 en 0.5°C por siglo y así mismo un aumento desde 1950 en cerca 1.8 °C (9). De acuerdo al panel intergubernamental de cambio climático la temperatura media mundial se ha incrementado en 0.74 °C en el último siglo (10). Es claro que la actividad ganadera posee un impacto importante sobre la contaminación del medio ambiente por medio de los gases de efecto invernadero.

Impacto del calentamiento global en la tierra.

La actividad humana ha afectado de forma alarmante la temperatura de la tierra provocando diversos cambios ambientales (11). Esta variabilidad climatológica posee un impacto desfavorable para las producciones agropecuarias perjudicando el rendimiento de los sistemas productivos ya que las modificaciones mínimas en las temperaturas pueden desencadenar una serie de fenómenos naturales extremos como las sequias e inundaciones afectando de forma directa los cultivos, provocando estrés en los animales e influenciando el brote de enfermedades (12;13). Por esta razón es necesario desarrollar estrategias nutricionales que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero como resultado de procesos metabólicos del rumiante, incrementando la eficiencia productiva y disminuyendo las pérdidas energéticas del ganado bovino, principalmente en forma de metano contribuyendo así en el rendimiento del sector ganadero y disminuyendo los impactos ambientales. Se estima que las pérdidas por el cambio climático

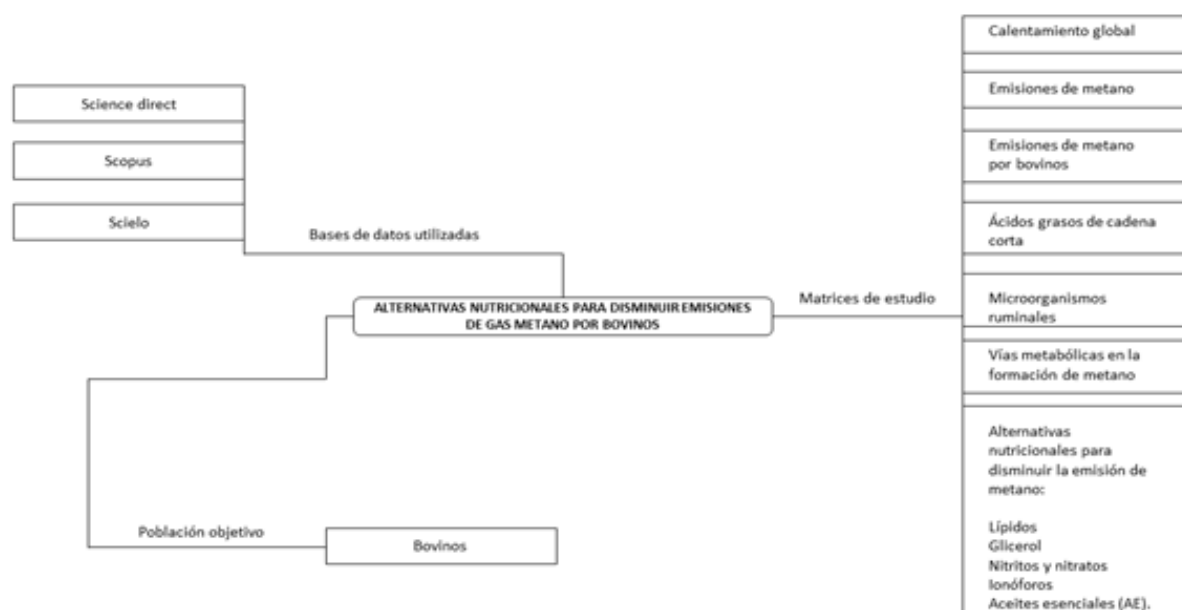


Figura 1. Metodología empleada para la clasificación y análisis de la información, empleando tres variables de búsqueda, población objetivo, clasificación de publicaciones mediante bases de datos y matrices de estudio

representaría el 4.3 % del producto interno bruto y afectaría gravemente la seguridad alimentaria del país (14).

Fermentación y caracterización del ambiente ruminal

Una solución ecológica y rentable económicamente se basa en la formulación de estrategias nutricionales que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero como resultado de procesos metabólicos del rumiante, incrementando la eficiencia productiva y disminuyendo las pérdidas energéticas del ganado bovino, principalmente en forma de CH₄ contribuyendo así en el rendimiento del sector ganadero y disminuyendo los impactos ambientales.

La fermentación en el rumen del bovino es posible gracias a la variedad de microorganismos presentes en dicho compartimiento los cuales son indispensables para llevar a cabo todos los procesos fermentativos de los alimentos (3). El rumen requiere que los microorganismos actúen directamente sobre el alimento para degradarlo y aportarle los nutrientes necesarios al animal. Existen parámetros de fermentación ruminal que hacen posible que el medio ruminal permanezca estable como un adecuado ecosistema para los microorganismos ruminales y puedan degradar los diferentes sustratos que llegan a este medio:

La temperatura: Es un factor que condiciona el desarrollo de los microorganismos ruminales y se mantiene en un rango de 38 a 42°C con un promedio de 39°C y condiciona las reacciones químicas dentro del rumen y la regulación térmica del animal (3).

La presión osmótica: Debe ser similar en el contenido del rumen a la de los tejidos (alrededor de 300 miliosmoles/litro), para evitar la pérdida de agua desde el líquido intersticial hacia el rumen o viceversa. Normalmente la presión osmótica se mantiene en 280 mOsm/L incrementándose en el momento de ingerir los alimentos por la mayor producción de los AGCC (3). Así, el parámetro normal de osmolaridad puede verse afectado por la ingestión de concentrados (Podría alcanzar 400 mOsm) lo que indica que con una alta osmolaridad podría inhibir a los microorganismos ruminales (15).

El pH ruminal: Es otro parámetro de gran importancia, el cual debe mantenerse controlado, recordando que este oscila entre los rangos óptimos de 5.5 a 6.9 para que los alimentos sean degradados adecuadamente por los microorganismos. El pH ruminal varía principalmente según el tipo de alimento, la forma y la frecuencia como este es ofrecido (Figura 2). Las raciones altas en carbohidratos no estructurales o rápidamente fermentables disminuyen el pH, mientras que las dietas ricas en carbohidratos estructurales, tienden a regularlo en su límite superior (16).

Microorganismos responsables por la digestión fermentativa

El rumen constituye un medio favorable y puede considerarse como una cámara de cultivo continuo y de gran eficacia para el desarrollo de microorganismos anaerobios. Los agentes responsables por la fermentación ruminal son

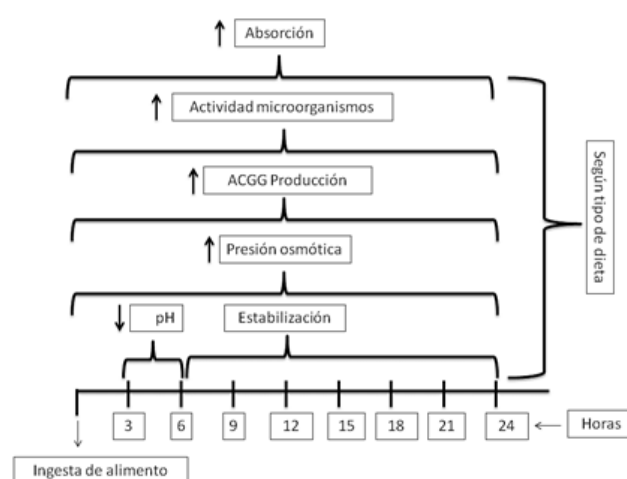


Figura 2. Comportamiento del pH ruminal seguido a la ingesta del alimento.

microorganismos unicelulares representados por bacterias, protozoarios y hongos. En términos cuantitativos 60 a 90 % de la masa microbiana ruminal está conformada por bacterias, 10 a 40 % por protozoarios ciliados y el resto 5-10 % por hongos (17).

Bacterias

La densidad bacteriana puede ir desde 10.000.000.000 a 100.000.000.000/mL de contenido ruminal. Dentro de las bacterias ruminales se encuentran: las celulolíticas, las cuales fermentan hidratos de carbono estructurales de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y pectinas) y como producto final de su metabolismo generan AGCC (especialmente acetato) (Olivera et al., 2007). Las especies celulíticas más conocidas son: *Bacteroides succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, *Ruminococcus albus*, *Clostridium loch headii* y *Cillobacterium cellulosolvens*. Las bacterias hemicelulolíticas, son organismos que usualmente hidrolizan celulosa y también pueden degradar y utilizar hemicelulosa, y entre las especies representadas se encuentran: *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Lachnospira multiparus* y *Bacteroides rumenicola*. En contraste, las bacterias amilolíticas predominan cuando se suministra en la dieta grandes cantidades de almidones (18). Estas bacterias fermentan hidratos de carbono de reserva como granos de almidón y como producto final generan AGCC (principalmente propionato) (19). Las especies más importantes que pueden digerir el almidón son: *Bacteroides amylophilus*, *Succinomonas amylofilica*, *Butyrivibrio fibrisolvens* y *Bacteroides rumenicola*. Existen otras bacterias de gran importancia, como las bacterias lipolíticas, las cuales metabolizan grasas y como producto final de su metabolismo generan ácidos grasos libres y AGCC (especialmente propionato) (19). Las proteolíticas degradan proteínas y como producto final de su metabolismo generan AGCC y amoníaco (NH₃) (19). Por otro lado, las bacterias sintetizadoras de vitaminas como *Selenomonas ruminatum* son de gran importancia ya que sintetizan vitaminas del complejo B y las proporcionan al rumiante.

Protozoarios

Los protozoarios ingieren partículas de alimentos y degradan los principales componentes de los vegetales incluyendo celulosa, hemicelulosa, pectina, almidón, azúcares solubles y lípidos (18). Los protozoos que hacen parte de la microbiota ruminal se desarrollan perfectamente a pH superior a 6. Normalmente, son adquiridos por el ternero por contacto directo con otros rumiantes. Los protozoos son incapaces de sintetizar proteínas a partir de NNP (Nitrógeno No Proteico) y son beneficiosos al moderar la fermentación amilolítica, debido en parte a que consumen preferentemente bacterias amilolíticas (Figura 3). Además, ingieren y engloban los trozos de almidón que pasan al intestino dentro del protozoo evitando una fermentación ácido-láctica y suministran de esa forma una fuente directa de glucosa para el animal. Los protozoos favorecen al rumiante, aumentando el valor biológico de la proteína con un costo energético elevado por el reciclaje de nitrógeno (3). Algunos de los protozoarios más importantes del rumen son: *Endodinium bovis*, *E. caudatum*, *E. chatterjeei*, *Isotricha intestinalis*, *Diplodinium dendatum* y *Polyplastrotn multivesiculatum* (19).

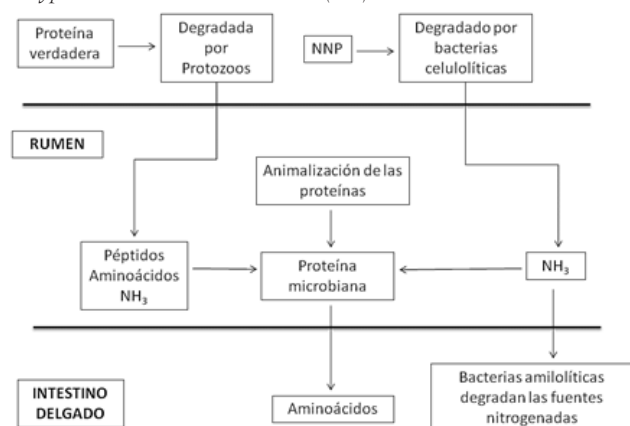


Figura 3. Mejoramiento del perfil de aminoácidos por acción de los protozoos.

Hongos

Los hongos representan alrededor del 8% de la biomasa ruminal, poseen una importante actividad celulítica en especial cuando el rumiante consume forrajes demasiado maduros. Los hongos no predominan en el rumen debido a su baja tasa de multiplicación en comparación con las bacterias, algunas de las cuales a su vez reprimen su crecimiento como *Ruminococcus spp* (3). Algunos de los hongos del rumen del bovino son: *N. hurleyensis*, *Sphaeromonas communis*, *Orpinomyces bovis* y *Anaeromyces mucronatus* (19)

Productos de la fermentación ruminal

La fermentación es un proceso anaerobio efectuado por la población microbiana ruminal que ocurre durante el metabolismo de los carbohidratos ingeridos por los rumiantes (20). Los microorganismos a través de sus vías metabólicas y mediante la fermentación anaeróbica convierten los carbohidratos en AGCC en forma de ácido acético, propiónico y butírico (21). La mayoría del ácido acético y todo el propiónico son transportados al hígado, mientras que la mayoría del ácido butírico se convierte

en la pared del rumen asociado a cuerpos cetónicos. Las dietas con alto contenido proteico también contribuyen a la producción de AGCC a través de la degradación de los aminoácidos hasta metabolitos secundarios capaces de convertirse en AGCC. En el proceso fermentativo también son producidos gases tales como el dióxido de carbono (CO₂) en 60% aproximadamente en rendimiento y metano (CH₄) en 30 a 40% dependiendo de la concentración y proporciones relativas de los ácidos grasos producidos (20;21). Por otro lado, cantidades variables de H₂ se originan de las reacciones de descarboxilación durante la fermentación y de las reacciones de neutralización de H⁺ por el HCO₃⁻ proveniente de la saliva o secretado por el epitelio ruminal durante la absorción de los AGCC. El CH₄ es originado como producto de la reducción del CO₂ y formado por las Arqueas metanogénicas (21).

Producción de ácido acético

El ácido acético es producido en el rumen por la vía del piruvato mediante las reacciones de descarboxilación oxidativa que suministra acetato, CO₂ e hidrógeno a través de la reacción que suministra acetato y formiato. En tal caso el formiato es metabolizado a CO₂ e hidrógeno dentro de las células que lo producen o por otros microorganismos en el líquido ruminal. Así mismo, el formiato es un buen sustrato para la producción de metano por parte de las arqueobacterias metanogénicas. Además de la producción de acetato, el rumen proporciona el mayor porcentaje de energía requerida por el rumiante y cuando es absorbido pasa directamente al torrente sanguíneo prácticamente sin ningún cambio. De forma práctica, cuando se suministra al animal forraje finamente picado la producción de ácido acético se ve disminuida en relación con los otros ácidos.

Producción de ácido propiónico

Existen dos vías para la producción de propionato en el rumen, una es la descarboxilación del succinato que es el principal precursor del propionato y la otra es a través de la reducción del lactato vía acrilato. Los principales microorganismos productores de propionato en el rumen son *Selenomonas ruminatum* y *Megasphaera elsdenii*. Solo un 5% del propionato es metabolizado por el epitelio ruminal a lactato de esta manera la mayor parte del propionato es transportado al hígado donde junto con los aminoácidos no esenciales se torna en la principal fuente de energía para el rumiante mediante la vía de gluconeogénesis. El incremento del ácido propiónico se observa al aumentar la cantidad de concentrado o carbohidratos rápidamente fermentables en la dieta (22).

Producción de ácido butírico

La producción de ácido butírico procede principalmente a través de la vía del Acetil CoA del piruvato y acetato extracelular. El ácido butírico es transformado en la pared del rumen en cuerpos cetónicos. Los cuerpos cetónicos, principalmente el β-hidroxibutirato, salen del hígado sin sufrir ningún cambio importante; estos cuerpos cetónicos son utilizados con mucha facilidad por los tejidos de los rumiantes excepto el hígado, cerebro y epitelio ruminal

(23). La concentración de ácido butírico y CO_2 induce un aumento en el aporte sanguíneo hacia el rumen facilitando la salida rápida de los productos de la digestión. Una pequeña cantidad de ácido butírico es utilizado en el hígado junto con otros ácidos grasos de cadena larga que se originan en el rumen durante la fermentación para síntesis de grasas más complejas. También puede ser oxidado produciendo radicales de acetyl que se utilizan en el ciclo de Krebs para producción de CO_2 y energía.

Metanogénesis en rumiantes

Durante el proceso de producción en el sector ganadero se emite al ambiente una cantidad significativa de gases como CO_2 , CH_4 y óxido nitroso (N_2O) que contribuyen al problema de efecto invernadero. El CH_4 producido por bovinos se origina especialmente de la fermentación entérica (85 a 90 %) siendo el resto producido a partir de las heces de estos animales. Del total de CH_4 producido por los rumiantes en el proceso de fermentación entérica en rumen: 95 % es excretado por eructación y producido en el tracto digestivo posterior; 89 % es excretado a través de la respiración y tan solo 11 % por el ano (24). En general, el CH_4 representa aproximadamente una cuarta parte de las emisiones antropogénicas que gas. Los bovinos producen entre 150 a 420 L/día de CH_4 ubicándose la ganadería como el mayor emisor contaminante dentro del sector pecuario a nivel mundial (25).

En la fermentación ruminal los factores nutricionales que determinan la cantidad de gas CH_4 producido son: la calidad del alimento, composición, digestibilidad, procesamiento previo e ingesta del alimento (26). La estacionalidad de la producción de forrajes afecta la calidad, así en la temporada seca en la que predominan los pastos tipo C4 que tienen un valor nutricional inferior en comparación con los pastos C3 (27). El CH_4 de origen entérico tiene relación directa con la eficiencia de la fermentación ruminal como resultado de la pérdida de carbono y consecuentemente de la pérdida de energía afectando de esta forma el desempeño animal (28). En términos generales, el proceso de metanogénesis cumple con un papel de aceptor de electrones removiendo continuamente el hidrógeno (H_2) del medio ruminal. Así, la formación de CH_4 se torna esencial para el óptimo desempeño del ecosistema ruminal porque evita la acumulación de H_2 en el rumen, lo cual podría generar la inhibición de la actividad deshidrogenasa relacionada en la re-oxidación de los cofactores reducidos. La remoción eficiente de H_2 del rumen contribuye al aumento de la tasa de fermentación debido a la eliminación de su efecto inhibitorio en la degradación microbiana de material vegetal (29).

Arqueas Metanogénicas

Para que el CH_4 se produzca en el rumen existe un grupo altamente especializado de microorganismos anaerobios estrictos que requieren condiciones libres de oxígeno y potencial redox (<330 mM) que en su mayoría tienen tiempos de duplicación prolongados desde horas hasta varios días (30). El metabolismo de las arqueas metanogénicas es muy específico y utilizan la energía en la producción

de CH_4 por medio del uso de diferentes sustratos como el H_2 y el CO_2 . El CO_2 es usado como su aceptor terminal de electrones en la respiración anaeróbica convirtiéndolo a CH_4 y utilizando H_2 como donador de electrones. Las condiciones anaerobias, la ausencia de luz y la presencia de NO_3^- , S y SO_4^{2-} que caracterizan la fermentación de materia orgánica conducen a la biogénesis de CH_4 (26).

El CH_4 es producido por microorganismos pertenecientes al dominio arqueas que comprende dos reinos: *Euryarchaeota* (metanogénicos, halófilos extremos y algunos hipertermófilos) y *Crenarchaeota*. Algunas de las especies que han sido clasificadas son: *Methanobacterium formicum*, *M. bryantii*, *M. thermoautotrophicum*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *M. arboriphilus*, *M. smithii*, *Methanococcus vanniellii*, *M. voltae*, *Methanomicrobium mobile*, *Methanogenium cariaci*, *M. marisnigri*, *Methanospirillum hungatei* y *Methanosarcina barkeri*. Estos microorganismos son muy diversos con estructuras morfológicas diferentes siendo únicos porque pueden usar sustancias simples para obtener energía y crecer; así como su habilidad para producir CH_4 . Estos metabolizan un número limitado de sustratos convierten los carbohidratos, proteínas y lípidos en fragmentos de menor peso molecular. Dichos sustratos pueden ser utilizados por bacterias acetogénicas (productoras de H_2) para formar acetato, H_2 y CO_2 y posteriormente estas moléculas son utilizadas por bacterias metanogénicas que promueven una adecuada y eficiente remoción del H_2 (26). Los microorganismos metanogénicos ruminales requieren un pH estable para una óptima fermentación pero este proceso metabólico considera una pérdida energética alta para el animal que puede llegar a ser potencialmente utilizable por este.

Formación de metano: vías metabólicas

Las principales fuentes en la producción y variación de metano son la cantidad de carbohidratos fermentados en el retículo-rumen lo cual implica diversas interacciones específicamente en la dieta del animal que afectan el balance entre las tasas de fermentación de dichos carbohidratos y la tasa de pasaje. El otro mecanismo es la relación de AGCC producidos la cual regula la producción de H_2 y la subsecuente producción de CH_4 (2). Las vías metabólicas involucradas en la fermentación ruminal y formación del metano son las vías anaerobias involucradas en la oxidación de carbohidratos. Fisiológicamente, la formación de metano se produce en la región entérica y ruminal; este proceso solo ocurre a nivel bioquímico por medio de una serie de reacciones específicas (17) (Figura 4). Por lo tanto, los principales productos de la fermentación microbiana de hidratos de carbono son los AGCC, CH_4 y CO_2 . Los alcoholes y el lactato también se forman durante este proceso, pero en general se reconoce que son relativamente poco importantes en el rumen. El problema básico en el metabolismo anaeróbico es el almacenamiento de oxígeno (como CO_2) y la eliminación de H_2 equivalentes (como CH_4). El CH_4 formado a partir de CO_2 a través de la vía del formato es aceptado directamente por las reacciones producidas en el rumen (17).

La producción de acetato y butirato que predomina durante

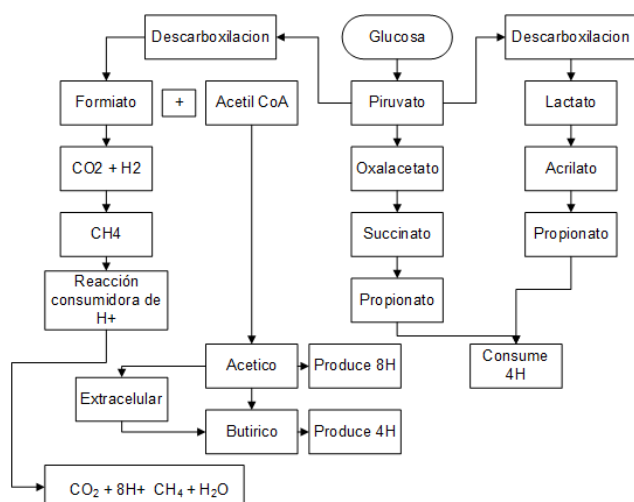


Figura 4. Vías metabólicas involucradas en la formación del metano.

la fermentación de carbohidratos fibrosos como resultado de la liberación neta de H₂ favorece la metanogénesis. En contraste, la formación del propionato es una vía competitiva en el uso del H₂ ruminal mediante la reducción de la disponibilidad de sustrato para la metanogénesis. Por lo tanto, la producción de metano depende de un equilibrio entre propionato de etilo y acetato con una gran disponibilidad de H₂ en el rumen (17).

La formación de CH₄ será mayor con la producción de acetato, menor con la producción de butirato y en cambio se consumen H₂ durante la síntesis de propionato (25). En el rumen, el acetato y el butirato promueven la producción de metano mientras que la formación de propionato puede ser considerada como una forma competitiva en el uso del H₂ en el compartimento ruminal (1). Aunque el CH₄ puede producirse a partir de AGCC y sumideros alternativos para H₂ se puede dar en otros procesos como la acetogénesis, pero su aporte de CH₄ es poco. En síntesis, se puede decir que el propionato interviene como un sumidero de H₂ disminuyendo la cantidad total de H₂ disponibles para reducir el CO₂ a CH₄.

Para poder disminuir las emisiones de metano hay que tener un conocimiento claro de las vías metabólicas implicadas en la formación y el uso de H₂ así como de la población metanogénica ruminal (31). Sin embargo, es de gran importancia conocer también cuales son las fuentes nutricionales que contribuyen a una disminución de las emisiones de CH₄ y a un mejor desempeño por parte del animal. Las principales fuentes que disminuyen estas emisiones son: concentrado, forrajes mejorados genéticamente, lípidos, glicerol, nitratos y nitritos, ionóforos y aceites esenciales (Figura 5).

Concentrado

El aumento de la cantidad de concentrado en una dieta totalmente mezclada reduce la emisión de CH₄ y genera el desarrollo de bacterias amilolíticas, lo que resulta en cambios en la producción de AGCC aumentando la proporción propionato y la reducción de etilo (25). En

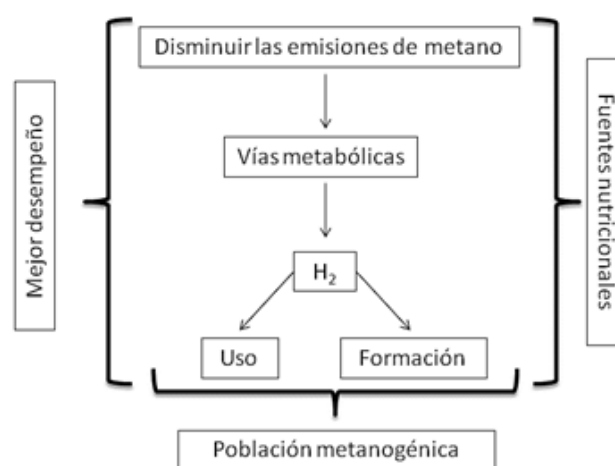


Figura 5. Alternativas nutricionales que disminuyan las emisiones de metano.

consecuencia, hay una caída en la producción de CH₄ debido a una reducción en la disponibilidad de H₂ en el medio ruminal (25), por lo tanto, las emisiones de metano se reducen por Kg de materia seca consumida (CMS) (33), reflejándose en una disminución de metano por unidad de leche producida (33). No obstante, esta disminución no ha sido significativa cuando se suministra en vacas lecheras hasta 6,0 Kg/día de concentrado basado en fibra (32).

Forrajes mejorados genéticamente

Los forrajes comúnmente usados en el pastoreo son muy apropiados para realizar un mejoramiento genético debido a su composición de metabolitos secundarios como son los taninos o saponinas que reducen el proceso metanogénico. Dentro de las mejoras que pueden realizarse en los forrajes se incluye un aumento del contenido de azúcar y la digestibilidad afectando las bacterias ruminales productoras de metano. Al mismo tiempo, maximizando el contenido de nitrógeno en la planta y reduciendo las emisiones de ácido nítrico y evitando el uso de fertilizantes nitrogenados (34).

Lípidos

La adición de lípidos a la dieta afecta la metanogénesis por diversos mecanismos, siendo uno de estos la hidrogenación de ácidos grasos insaturados debido a que este mecanismo resulta en captura de iones de H₂. La presencia de lípidos en la dieta aumenta la producción de ácido propiónico e inhibe la acción de protozoarios. Se ha demostrado que la adición de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga como linoleico y linolenico reducen la metanogénesis ya que se convierten en una ruta alterna consumidora de H₂ y pueden ser tóxicos para algunas bacterias. Los efectos tóxicos de los ácidos grasos de cadena larga ocurren por acción en la membrana celular de los microorganismos (1) La eficiencia de la adición de lípidos para reducir las emisiones de CH₄ depende del nivel de suplementación, la fuente lipídica y de la forma de suministro (35).

Glicerol

La creciente producción de biodiesel ha conducido a un aumento en la obtención de glicerina como un subproducto de eliminación en esta industria. La inclusión de glicerol (el componente principal de la glicerina bruta) como un componente importante de la dieta ha sido reportado en el ganado vacuno como fuente de energía para los rumiantes en sustitución de los granos de cereales (36). Tres destinos diferentes han sido reportados para el glicerol al entrar en el rumen: Primero, el pasaje hasta el intestino inferior; segundo, los microorganismos ruminales hidrolizan el glicerol y es absorbido a través de la pared del rumen, posteriormente tiene una conversión a glucosa en el hígado (37); y por último en la fermentación para propionato resulta en aumentos en la glucosa en sangre en el ganado. Las rutas hacia la producción del propionato son conocidas por actuar como sumidero de hidrógeno y serían por tanto eficientes en reducir las emisiones de CH₄ también aumenta la velocidad de paso del rumen (38).

La adición de glicerol a la alfalfa y el maíz reduce la producción de metano 24 h después de su consumo. La reducción en la producción de CH₄ es mayor en los con los granos, el salvado y las harinas oleaginosas debido a que estos tienen una degradación ruminal más eficiente en comparación con los forrajes (39)

Nitritos y nitratos

Los nitratos son prometedores como agentes entéricos de mitigación de CH₄ en particular en dietas bajas en proteínas que pueden beneficiarse de los suplementos de nitrógeno. El nitrato es un sumidero de electrones y se ha informado que reduce la producción de metano en el ganado. La reducción de nitrato a amonio produce más energía si se compara con la formación de metano. (41), el nitrato actúa como una fuente alternativa de hidrogeno y por lo tanto disminuye la formación de metano entérico (41). Sin embargo, se producen nitritos como productos intermedios los cuales al acumularse pueden causar metahemoglobinemia en caso de animales no adaptados (40).

La inclusión de altas concentraciones de nitrato demostró una disminución en la producción de metano entérico del 16 al 25% en g/kg de consumo de materia seca con un nivel de inclusión de nitrato de 21g/kg de materia seca (42). Por lo tanto su inclusión en grandes cantidades sugiere una disminución en las emisiones de metano entérico.

Ionóforos

Los ionóforos en los bovinos benefician la proliferación de bacterias amilolíticas, de forma indirecta los ionóforos favorecen en la fermentación anaeróbica la producción de propionato que es un sumidero de 4 H₊ (44), limitando la formación de metano. Los ionóforos inhiben la metanogénesis al disminuir los sustratos que utilizan las bacterias metanogénicas (17), los cuales son; los hidrogeniones y el formiato, ya que los microorganismos que producen estos sustratos son sensibles a los ionóforos mientras que los metanogenos y las bacterias que reducen el succinato a propionato son resistentes a los ionóforos, por lo que se evidencia un incremento en la producción

de propionato y una disminución en la producción de metano (43). La reducción de las emisiones de CH₄ en animales suplementados con monensina se relaciona con el incremento en la eficiencia fermentativa (45). La alimentación en ganado de engorde con dosis de 100 y 500 mg de monensina al día, demostró un incremento en la producción de propionato por lo tanto, una disminución en la formación del metano (43)

Aceites esenciales (AE)

Los aceites esenciales tienen un efecto inhibitorio selectivo de microorganismos hiper-productores de CH₄ mejorando el metabolismo de la proteína y el almidón y generando una mayor producción de AGCC especialmente de ácido propiónico (abundantes en especies vegetales) (46).

Una de las principales ventajas asociadas con la adición de aceites esenciales es su capacidad para reducir la degradación de proteínas por lo tanto una mayor degradación de N₂, planteándose la hipótesis de que actúan en la reducción de tasa de desaminación en el rumen y disminuyen la adherencia y colonización de bacterias proteolíticas a sus sustratos (47). Se ha demostrado que la mezcla de aceites esenciales inhibe la degradación de proteínas aunque los cambios reportados indicaron pequeños y variables en función de la alimentación que degradaron el tipo de ración de alimentos a los animales y la duración del período de adaptación (48). La eliminación de protozoos en rumiantes puede reducir la capacidad de absorción de los nutrientes porque los protozoos tienen un papel importante en la degradación del almidón (49) (Figura 6).

El efecto de los aceites esenciales sobre el número de protozoos en el rumen indica que sólo dosis muy grandes de AE pueden reducir el número de protozoos. Se observaron cambios en la población de protozoarios en ganado productor de leche incluyendo una mezcla de aceites esenciales (dosis de 110 y 750 mg/d) en la ración alimenticia diaria (50).

Otros estudios realizados han reportado que la alimentación con 200 g/kg de materia seca (MS) de menta (*Mentha piperita*) en novillos Holstein disminuye el número total de protozoarios y específicamente el número de protozoarios del genero *Entodinium*, *Isotricha* y *Diplodinium*. También se ha observado que el aceite de clavo decrece el número total de protozoarios afectando a las especies de menor tamaño como *Entodinium* y *Holotrichos*, pero no a los *Entodinium* de mayor tamaño (51).

En otro estudio se observó que el cinemaldehido a dosis de 0.4 a 1.6 g/d en novillos productores de carne no afectó el total de protozoarios pero sí a los protozoarios del genero *Isotricha*, *Dasitricha* y *Entodinium* (52). Además la inclusión de 1 g/d de anetol en 2 g de extracto de anís a novillos productores de carne reveló una disminución en el conteo de *Holotrichos* y *Entodinomorfos* (53). Se encontró que la adición de menta en bovinos productores de leche 200 g/d logró reducir el total de protozoarios (54).

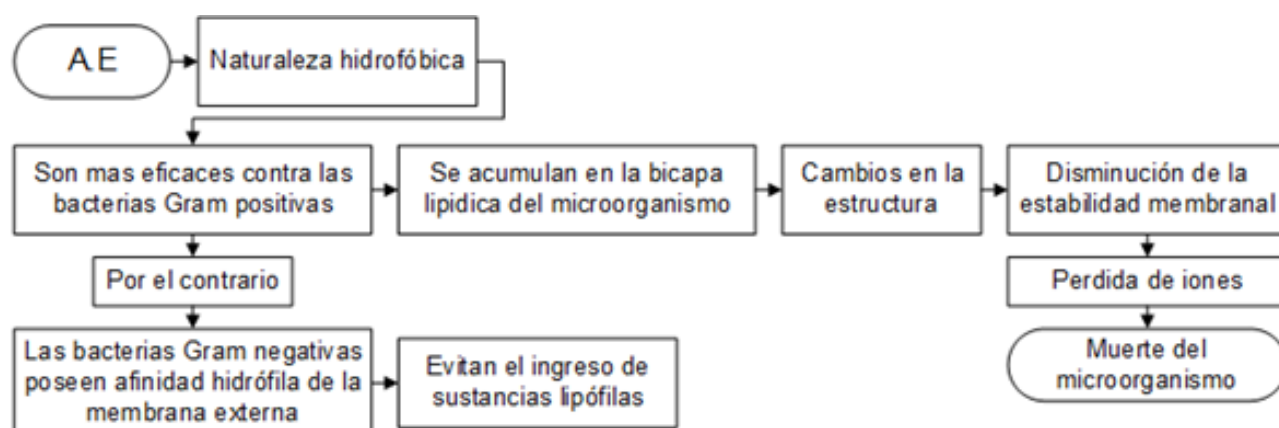


Figura 6. Alternativas nutricionales que disminuyan las emisiones de metano.

Conclusiones

En la presente revisión se presenta un análisis acerca del proceso de fermentación ruminal, la caracterización del medio ruminal, los microorganismos que participan en la degradación de los sustratos y los productos generados durante el proceso fermentativo. Así, es necesario conocer diferentes alternativas nutricionales no convencionales que existen para reducir las emisiones de CH₄ con el fin de contribuir en un aspecto positivo a nivel ambiental y generar alternativas de producción sustentables, orientadas al aumento del desempeño animal sin ocasionar daños en el medio ambiente.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores manifiestan sus agradecimientos a la doctora Laura Alexandra Solorzano Romero por sus aportes en la construcción del manuscrito.

Referencias

- Carmona JC, Bolívar DM, Giraldo LA. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev Colomb ciencias Pecu.* 2005;18(1):49-63.
- Johnson KA, Johnson DE. Methane emissions from cattle. *J Anim Sci.* 1995;73(8):2483-92.
- Relling AE, Mattioli GA. Fisiología digestiva y metabólica de los Rumiantes. La Plata: EDULP; 2003. 1-72 p.
- Wuebbles DJ, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Rev.* 2002;57(3):177-210.
- Tamminga S. Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. *J Dairy Sci.* 1992;75(1):345-57.
- Holter JB, Young AJ. Methane Prediction in Dry and Lactating Holstein Cows1. *J Dairy Sci.* 1992;75(8):2165-75.
- Barros V. Cambio climático global. Libros del Zorzal; 2006.
- Lorente Saiz A, others. Ganadería y cambio climático: una influencia recíproca. 2010;
- Ortiz R. El cambio climático y la producción agrícola. Banco Int Desarro (BID), Unidad Salvaguardias Ambient (VPS/ESG), Notas Técnicas ESG-TN-383 41 pp. 2012;
- Alonso-Spilsbury M, Ramirez-Necochea R, de Jesús Taylor-Preciado J. El cambio climático y su impacto en la producción de alimentos de origen animal. *REDVET Rev Electrónica Vet.* 2012;13(11):1-25.
- Duarte CM, Alonso S, Benito G, Dachs J, Montes C, Pardo Buend'via M, et al. Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. CSIC. Consejo superior de investigaciones científicas; 2006.
- Zhao Y, Wang C, Wang S, Tibig L V. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics. In: *Increasing Climate Variability and Change.* Springer; 2005. p. 73-116.
- Nelson GC, Rosegrant MW, Koo J, Robertson R, Sulser T, Zhu T, et al. Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. IFPRI; 2009.
- Espinosa ACÁ, Calderón SL, Romero G, Ordoñez DA, others. Análisis macroeconómico de los impactos sectoriales de cambio climático en Colombia. 2014.
- Lier E, Regueiro M. Digestión en retículo-rumen. *Prod*

- Anim Dep Fisiol Fac Vet Montevideo Bols del Libr. 2008;
16. Calsamiglia S, Sánchez MC. Acidosis ruminal y estrategias de prevención en vacuno lechero. *Prod Anim.* 2006;21(220):66–76.
 17. Van Soest PJ. *Nutritional ecology of the ruminant.* Cornell University Press; 1994.
 18. Hobson PN, Wallace RJ, Bryant MP. Microbial ecology and activities in the rumen: Part I. *CRC Crit Rev Microbiol.* 1982;9(3):165–225.
 19. de Oliveira JS, de Moura Zanine A, Santos EM. Diversidade microbiana no ecossistema ruminal. *REDVET Rev Electrónica Vet.* 2007;8(6):1–12.
 20. Church DC. *The Ruminant animal: digestive physiology and nutrition.* 1988.
 21. Eun J-S, Fellner V, Gumpertz ML. Methane production by mixed ruminal cultures incubated in dual-flow fermentors. *J Dairy Sci.* 2004;87(1):112–21.
 22. Bath IH, Rook JAF. The evaluation of cattle foods and diets in terms of the ruminal concentration of volatile fatty acids I. The effects of level of intake, frequency of feeding, the ratio of hay to concentrates in the diet, and of supplementary feeds. *J Agric Sci.* 1963;61(3):341–8.
 23. Leng RA, Annison EF. The metabolism of D (-) β -hydroxybutyrate in sheep. *Biochem J.* 1964;90(3):464.
 24. Murray RM, Bryant AM, Leng RA. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *Br J Nutr.* 1976;36(1):1–14.
 25. Machado FS, Chaves AV. Documentos 147. 2011;1–92.
 26. Bonilla JA, Lemus C. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión global climate change. Review. *Rev Mex ciencias Pecu.* 2012;3(2):215–46.
 27. Charmley E, Stephens ML, Kennedy PM. Predicting livestock productivity and methane emissions in northern Australia: development of a bio-economic modelling approach. *Aust J Exp Agric.* 2008;48:109–13.
 28. Cotton WR, Pielke Sr RA. *Human impacts on weather and climate.* Cambridge University Press; 2007.
 29. Mcallister TA, Newbold CJ. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Aust J Exp Agric.* 2008;48:7–13.
 30. Sosa A, Galindo J, Bocourt R. Metanogénesis ruminal: aspectos generales y manipulación para su control *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 41, núm. 2, 2007, pp. 105-114 Instituto de Ciencia Animal La Habana, Cuba. *Rev Cuba Cienc Agrícola.* 2007;41(2):105–14.
 31. Martin C, Morgavi DP, Doreau M. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *animal.* 2010;4(3):351–65.
 32. Lovett DK, Stack LJ, Lovell S, Callan J, Flynn B, Hawkins M, et al. Manipulating enteric methane emissions and animal performance of late-lactation dairy cows through concentrate supplementation at pasture. *J Dairy Sci.* 2005;88(8):2836–42.
 33. Jiao HP, Dale AJ, Carson AF, Murray S, Gordon AW, Ferris CP. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *J Dairy Sci.* 2014;97(11):7043–53.
 34. Abberton MT, MacDuff JH, Marshall AH, Humphreys MW. The genetic improvement of forage grasses and legumes to enhance adaptation of grasslands to climate change. *Plant Breed Genet Program Inst Grassl Environ Res Aberystwyth, United Kingdom Plant Prod Prot Div Crop Grassl Serv.* 2008;
 35. Beauchemin KA, McGinn SM. Methane emissions from beef cattle: effects of fumaric acid, essential oil, and canola oil. *J Anim Sci.* 2006;84(6):1489–96.
 36. Avila JS, Chaves A V, Hernandez-Calva M, Beauchemin KA, McGinn SM, Wang Y, et al. Effects of replacing barley grain in feedlot diets with increasing levels of glycerol on in vitro fermentation and methane production. *Anim Feed Sci Technol.* 2011;166:265–8.
 37. Bryant MP. Microbial methane production— theoretical aspects. *J Anim Sci.* 1979;48(1):193–201.
 38. Mills J. AN, Dijkstra J, Bannink A, Cammell SB, Kebreab E, France J. A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: Model development, evaluation, and application. *J Anim Sci.* 2001;79:1584–97.
 39. Lee S-Y, Lee S-M, Cho Y-B, Kam D-K, Lee S-C, Kim C-H, et al. Glycerol as a feed supplement for ruminants: In vitro fermentation characteristics and methane production. *Anim Feed Sci Technol.* 2011;166:269–74.
 40. Hulshof RBA, Berndt A, Gerrits WJJ, Dijkstra J, Van Zijderveld SM, Newbold JR, et al. Dietary nitrate supplementation reduces methane emission in beef cattle fed sugarcane-based diets. *J Anim Sci.* 2012;90(7):2317–23.
 41. Olijhoek DW, Hellwing ALF, Brask M, Weisbjerg MR, Højberg O, Larsen MK, et al. Effect of dietary nitrate level on enteric methane production,

- hydrogen emission, rumen fermentation, and nutrient digestibility in dairy cows. *J Dairy Sci.* 2016;99(8):6191–205.
42. Klop G, Hatew B, Bannink A, Dijkstra J. Feeding nitrate and docosahexaenoic acid affects enteric methane production and milk fatty acid composition in lactating dairy cows. *J Dairy Sci.* 2016;99(2):1161–72.
43. McGuffey RK, Richardson LF, Wilkinson JID. Ionophores for dairy cattle: current status and future outlook. *J Dairy Sci.* 2001;84:E194--E203.
44. Wolin MJ. A theoretical rumen fermentation balance. *J Dairy Sci.* 1960;43(10):1452–9.
45. Johnson KA, Johnson DE. Methane Emissions from Cattle. *Am Soc Anim Sci.* 2012;73:2483–92.
46. Patra AK. Effects of essential oils on rumen fermentation, microbial ecology and ruminant production. *Asian J Anim Vet Adv.* 2011;6:416–28.
47. McEwan NR, Graham RC, Wallace RJ, Losa R, Williams P, Newbold CJ. Effect of essential oils on protein digestion in the rumen. *Reprod Nutr Dev.* 2002;42(1):S65--S65.
48. McIntosh FM, Williams P, Losa R, Wallace RJ, Beever DA, Newbold CJ. Effects of essential oils on ruminal microorganisms and their protein metabolism. *Appl Environ Microbiol.* 2003;69(8):5011–4.
49. FONSECA AJM, DIAS-DA-SILVA AA. Efeitos da eliminação dos protozoários do rúmen no desempenho produtivo de ruminantes--Revisão. *Rev Port Ciências Veterinárias, Lisboa.* 2001;96(538):60–4.
50. Benchaar C, Chaves A V, Fraser GR, Wang Y, Beauchemin KA, McAllister TA. Effects of essential oils and their components on in vitro rumen microbial fermentation. *Can J Anim Sci.* 2007;87(3):413.
51. Patra AK, Kamra DN, Agarwal N. Effects of extracts of spices on rumen methanogenesis, enzyme activities and fermentation of feeds in vitro. *J Sci Food Agric.* 2010;90(3):511–20.
52. Yang WZ, Ametaj BN, Benchaar C, Beauchemin KA. Dose response to cinnamaldehyde supplementation in growing beef heifers: ruminal and intestinal digestion. *J Anim Sci.* 2010;88(2):680–8.
53. Cardozo PW, Calsamiglia S, Ferret A, Kamel C. Effects of alfalfa extract, anise, capsicum, and a mixture of cinnamaldehyde and eugenol on ruminal fermentation and protein degradation in beef heifers fed a high-concentrate diet. *J Anim Sci.* 2006;84(10):2801–8.
54. Ando S, Nishida T, Ishida M, Hosoda K, Bayaru E. Effect of peppermint feeding on the digestibility, ruminal fermentation and protozoa. *Livest Prod Sci.* 2003;82(2):245–8.