



FATV

AA  
P

## ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE METANO NA PECUÁRIA LEITEIRA

Luiz Gustavo Ribeiro Pereira<sup>1</sup>  
Fernanda Samarini Machado<sup>1</sup>  
Mariana Magalhães Campos<sup>1</sup>  
Roberto Guimarães Júnior<sup>2</sup>  
Thierry Ribeiro Tomich<sup>3</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e do seu poder aquisitivo tem promovido aumento acentuado da demanda por alimentos de origem animal. Estima-se que em 2050 a população mundial será de 9 bilhões, sendo necessário um aumento na produção mundial de carne de 229 milhões de toneladas (1999-2001) para 465 milhões de toneladas em 2050, e na produção de leite de 580 para 1.043 milhões de toneladas nesse mesmo período (FAO, 2006). O Brasil ocupa posição de destaque como fornecedor de proteína animal para a população mundial. Atualmente o país possui o maior rebanho comercial bovino, com 171,6 milhões de cabeças (IBGE, 2009) e detém, aproximadamente, 20% do mercado da carne (USDA, 2009), sendo o 5º maior produtor de leite (FAO, 2012).

Apesar da reconhecida importância da agropecuária na produção de alimentos e geração de renda, atualmente muito se discute sobre o impacto ambiental das atividades pecuárias e agrícolas, principalmente relativo às mudanças climáticas. A pecuária brasileira, em especial, vem sendo criticada por emitir quantidades significativas de gases de efeito estufa (GEE). Tal crítica tem sido fundamentada nos baixos índices zootécnicos verificados em sistemas de exploração animal baseados em pastagens degradadas ou que se encontram abaixo do seu potencial de produção. A ineficiência desse modelo de exploração tem gerado maiores quantidades de GEE por quilo de carne e/ou de leite produzidos (IPCC, 2007).

Dentre os vários GEE, a agropecuária contribui de forma significativa com a emissão de três deles: metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (NO<sub>2</sub>). O gás metano apresenta potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o CO<sub>2</sub> e tempo de vida na atmosfera de 9 a 15 anos, sendo sua taxa de crescimento anual de 7,0% (IPCC, 2006). A produção de metano resulta da fermentação anaeróbica da matéria orgânica em ambientes alagados, campos de arroz cultivados por irrigação de inundação, fermentação entérica, tratamento anaeróbico de resíduos animais e queima de biomassa.

O metano produzido em sistemas de produção de bovinos origina-se, principalmente, da fermentação entérica (85 a 90%), sendo o restante produzido a partir dos dejetos destes animais. Do metano produzido por fermentação entérica no rúmen, 95% é excretado por

<sup>1</sup> Pesquisadores da Embrapa Gado de Leite, membros da rede PECUS-RumenGases\* (\*Financiada pelo CNPq-REPENSA, Embrapa e FAPEMIG-PPM)

<sup>2</sup> Pesquisador da Embrapa Cerrados

<sup>3</sup> Pesquisador da Embrapa Pantanal



eructação, e daquele produzido no trato digestivo posterior, 89% é excretado via respiração e aproximadamente 1% pelo ânus (Murray et al., 1976). O metano derivado da fermentação entérica de ruminantes representa cerca de  $\frac{1}{4}$  das emissões antropogênicas desse gás (Wuebbles e Hayhoe, 2002).

Bovinos produzem de 150 a 420 litros de  $\text{CH}_4$  por dia e ovinos de 25 a 55 L/dia (Czerkawski, 1969; Holter e Young, 1992; McAllister et al., 1996), o que corresponde a emissões anuais de 39,1 a 109,5 kg e de 6,5 a 14,4 kg, respectivamente. A Índia e o Brasil lideram o ranking mundial de emissão total de metano entérico, com 14,5 e 10,3 Tg de  $\text{CH}_4$ /ano, respectivamente. Quando é considerada apenas a emissão por bovinos, o Brasil é apontado como o maior emissor (9,6 Tg de  $\text{CH}_4$ /ano), seguido da Índia (8,6 Tg de  $\text{CH}_4$ /ano) e dos Estados Unidos da América (5,1 Tg de  $\text{CH}_4$ /ano) (Thorpe, 2009). Segundo resultados preliminares do Segundo Inventário Nacional de Emissões de GEE (MCT, 2009), no ano de 2005 a agropecuária foi responsável por 22% do total das emissões de metano no Brasil.

Além de ser caracterizado como um importante GEE, responsável por 15% do aquecimento global, o metano de origem entérica tem relação direta com a eficiência da fermentação ruminal em virtude da perda de carbono e, conseqüentemente, perda de energia, influenciando o desempenho animal (Cotton e Pielke, 1995; Bell et al., 2011). O conhecimento dos mecanismos de síntese de metano e os fatores que afetam sua produção são importantes. O desafio no sistema produtivo de ruminantes é desenvolver dietas e estratégias de manejo que minimizem a produção relativa de metano (metano/kg de leite, carne ou lã), possibilitando maior eficiência produtiva e redução da contribuição negativa da pecuária para o aquecimento global.

A mídia tem rotulado os bovinos como grandes vilões das mudanças climáticas, sendo que, na maioria das vezes, essas críticas não apresentam fundamentação técnico-científica. É urgente a necessidade de desenvolver e validar metodologias acuradas de mensuração da emissão de metano e gerar bancos de dados específicos para os sistemas de produção de cada região (país ou bioma), conforme relatado no primeiro inventário nacional de emissões de GEE de origem antrópica (Grainger et al., 2007; Lima et al., 2006). A exploração equivocada da mídia sobre o assunto pode ser, futuramente, um pretexto para a criação de barreiras não tarifárias à exportação de produtos pecuários brasileiros.

Discussões sobre como reduzir as emissões de GEE têm focado tanto alterações na cadeia de produção e abastecimento de alimentos, como na demanda, por meio de mudanças significativas nos padrões de consumo. Medidas políticas que levam a reduções radicais no consumo de alimentos de origem animal têm sido propostas como meio de reduzir as emissões globais de GEE. Entretanto, a avaliação do impacto climático da produção de diferentes alimentos deve levar em consideração o valor nutricional dos mesmos.

Smedman et al. (2010) utilizaram uma unidade funcional, que combina a densidade de nutrientes do alimento com a emissão de GEE na produção dos mesmos, denominada índice de Densidade Nutricional/Impacto climático (DNIC). Os autores compararam a emissão de GEE geradas para a produção de leite, refrigerantes, suco de laranja, cerveja,



vinho, água mineral gasosa e bebidas de soja e aveia. Para a produção de leite foram gerados para cada 100 g do produto, 99 g de equivalente CO<sub>2</sub>, um dos valores mais elevados quando comparado às demais bebidas. Entretanto, quando a comparação foi realizada levando-se em consideração o DNIC (densidade de nutrientes/emissão de GEE), o leite apresentou vantagem em relação aos demais alimentos, devido ao seu alto valor nutricional (Tabela 1). Esse resultado representa argumento convincente de embate à mídia, que muitas vezes incentiva a redução no consumo de produtos de origem animal como forma de diminuir os impactos ambientais.

Tabela 1. Densidade nutricional, em relação ao impacto climático

Alimento	Porcentagem de NNR em 100 g de produto	Número de nutrientes $\geq$ 5% da NNR	Densidade nutricional	Emissão de GEE	Índice DNIC
Leite	126	9	53,8	99	0,54
Refrigerante	7	0	0	109	0
Suco de laranja	90	4	17,2	61	0,28
Cerveja	18	0	0	101	0
Vinho tinto	24	1	1,2	204	0,01
Água mineral	2	0	0	10	0
Bebida de soja	53	3	7,6	30	0,25
Bebida de aveia	32	1	1,5	21	0,07

NNR = Recomendações Nórdicas de Nutrição; Índice DNIC = Índice de Densidade Nutricional/Impacto Climático (DNIC = densidade nutricional/emissão de gases de efeito estufa - GEE); Emissão de GEE = emissão de GEE (g de equivalente CO<sub>2</sub> por 100 g de produto); Densidade nutricional = Porcentagem de NNR em 100 g de produto x número de nutrientes  $\geq$  5% da NNR/21. Fonte: Smedman et al. (2010)

É provável que a agropecuária seja cada vez mais afetada pelas imposições de limitações nas emissões de carbono e pela legislação ambiental. A tendência ou obrigação legal de mitigar as emissões de GEE influenciará diretamente a necessidade de aumento da eficiência zootécnica nos sistemas pecuários, atrelado ao manejo nutricional dos animais a ser adotado. A melhoria das práticas alimentares pode reduzir a emissão de metano por quilograma de alimento ingerido ou por quilograma de produto (McAllister, 2011). Agentes específicos e aditivos dietéticos têm sido propostos como alternativas para a redução das emissões de metano. O desenvolvimento de estratégias de mitigação e a viabilidade da aplicação prática dessas estratégias são áreas atuais de pesquisa em todo o mundo (Thornton, 2010).

## 2. FORMAÇÃO DO METANO ENTÉRICO E SEU PAPEL NO ECOSISTEMA RUMINAL

A fermentação dos componentes dietéticos pela microbiota ruminal resulta na formação



VI SIMPÓSIO MINEIRO E I SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE  
NUTRIÇÃO DE GADO DE LEITE  
13 a 15 de abril de 2012



de ácidos graxos voláteis (AGVs), usados pelo ruminante como fonte de energia, e produção de gases ( $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ), eliminados por meio da eructação (Martin et al., 2009a).

A fermentação em ruminantes envolve processo oxidativo, gerador de cofatores reduzidos (NADH, NADPH e FADH). Para que o processo fermentativo não seja paralisado, esses cofatores são então re-oxidados ( $\text{NAD}^+$ ,  $\text{NADP}^+$  e  $\text{FAD}^+$ ) por meio de reações de desidrogenação, liberando hidrogênio no rúmen.

Como processo aceptor de elétrons, a metanogênese remove continuamente o gás Hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) do meio. Dessa forma, a formação de metano é essencial para o ótimo desempenho do ecossistema ruminal, porque evita o acúmulo de  $\text{H}_2$  no rúmen, o que poderia levar à inibição da atividade desidrogenase, envolvida na re-oxidação dos cofatores reduzidos. A remoção eficiente do  $\text{H}_2$  do rúmen contribui para o aumento da taxa de fermentação pela eliminação do seu efeito inibitório na degradação microbiana de materiais vegetais (Wolin, 1979; McAllister e Newbold, 2008).

O metano entérico é derivado da atividade das *Archaea* metanogênicas, um grupo microbiano distinto das *Eukarya* (protozoários e fungos) e *Bacteria*, possuindo cofatores (coenzima M, F420 e F430) e lipídeos (ésteres de isopropanil glicerol) únicos. Diante da função central do  $\text{H}_2$  no metabolismo, as metanogênicas são extremamente importantes para o funcionamento do rúmen e nutrição animal, apesar de responderem por pequena parte da biomassa microbiana ruminal (Janssen e Kirs, 2008).

Como as *Archaea* metanogênicas são responsáveis pela produção de metano nos ruminantes, considerável esforço de pesquisa tem sido direcionado para caracterizá-las (Attwood et al., 2008; Attwood et al., 2011). A identificação do espectro de atividades metabólicas e diversidade desses microrganismos são condicionais para o desenvolvimento de estratégias de mitigação da emissão de metano entérico. O sequenciamento de seus genomas fornecerá importantes informações que indicarão os alvos mais adequados para estratégias mitigadoras (Buddle et al., 2010).

Na complexa comunidade microbiana do trato gastrointestinal, muitos outros microrganismos exercem importante influência na produção de metano, seja por proporcionar ambiente adequado para a sobrevivência das metanogênicas ou por produzir substratos utilizados pelas mesmas. As vias metabólicas envolvidas na formação de hidrogênio, bem como as relações interespecies da população metanogênica com os demais microrganismos do ecossistema ruminal, são importantes fatores que devem ser considerados no desenvolvimento de estratégias para o controle da emissão de metano por ruminantes.

O  $\text{H}_2$  produzido durante a fermentação microbiana do alimento é usado como fonte de energia pelas *Archaea* metanogênicas, que produzem metano. O formato também pode ser utilizado pelas metanogênicas, mas é menos importante como precursor do metano do que o  $\text{H}_2$ , contribuindo com aproximadamente 18% da produção (Hungate et al., 1970).

Os diferentes produtos formados durante a fermentação ruminal (AGVs) não são equivalentes em termos de liberação de  $\text{H}_2$ . Portanto, a quantidade de  $\text{H}_2$  livre liberado no rúmen depende da concentração e proporções relativas de acetato, propionato e butirato



produzidos (Owens e Goetsch, 1988; Eun *et al.*, 2004; Martin *et al.*, 2009a). Existem modelos matemáticos quantitativos que propõem cálculos estequiométricos da fermentação para balancear a formação de  $H_2$ , ácidos graxos voláteis e outros produtos, na tentativa de prever a formação de metano (Bannink *et al.*, 2006; Ellis *et al.*, 2008a).

## 2.1 INFLUÊNCIA DA DIETA E DOS PARÂMETROS RUMINAIS NA FORMAÇÃO DE METANO ENTÉRICO

Em altas concentrações de  $H_2$ , menor quantidade desse gás será formada, já que as vias que produzem menos  $H_2$  serão favorecidas. A concentração de  $H_2$  no rúmen será elevada nas seguintes situações:

- (i) Após a alimentação e quando alimentos prontamente degradados são rapidamente digeridos;
- (ii) Quando a concentração de  $H_2$  requerida para manter a taxa de crescimento das metanogênicas no rúmen for elevada, tal como: rápida taxa de passagem e baixo pH ruminal;
- (iii) Quando inibidores de metano estão presentes.

A seguir, esses tópicos são abordados:

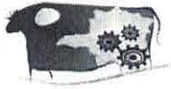
*Após a alimentação e quando alimentos prontamente degradados são rapidamente digeridos*

A proporção de metano como produto do metabolismo ruminal é mais baixa logo após a alimentação, e aumenta com o tempo. Ao contrário, as concentrações de  $H_2$  aumentam após a alimentação e, pode-se esperar que a elevada concentração de  $H_2$  resultará em mudança para vias com menor produção desse gás e maior de propionato. À medida que o alimento é digerido, e as concentrações de  $H_2$  reduzem-se, as vias de produção desse gás tornam-se novamente favoráveis, fazendo com que a produção de propionato decresça e a de metano aumente (Janssen, 2010).

Em condições favoráveis à elevação nas concentrações de  $H_2$  no meio por longos períodos, esperaram-se mudanças na estrutura da comunidade microbiana. Isso porque microrganismos que são consistentemente mais competitivos (ou seja, que utilizam vias com  $\Delta G$  mais negativo para produzir mais biomassa), eventualmente dominam o rúmen. Nessas condições, ocorrem mudanças nas vias de fermentação, que resultam em menor produção de metano, e menor ou menos ativa população de metanogênicas. Esse fato justifica os resultados encontrados por Van Kessel e Russel (1996), em que vacas alimentadas com dietas baseadas em grãos apresentaram população de metanogênicas menor ou menos ativa.

*Quando a concentração de  $H_2$  requerida para manter a taxa de crescimento das metanogênicas no rúmen for elevada, tal como: rápida taxa de passagem e baixo pH ruminal*

A taxa de passagem de sólidos no rúmen é mais lenta do que a da fase líquida, e mais de 95% da biomassa microbiana de ruminantes alimentados com forragem está associada a



partículas (Czerkawski, 1986). Menor taxa de crescimento é necessária para os microrganismos aderidos manterem-se no rúmen, visto que são removidos mais lentamente do que microrganismos não aderidos (McAllister et al., 1994).

O genoma da espécie *Methanobrevibacter ruminantium* contém genes codificadores de proteínas e polissacarídeos que podem estar envolvidos na aderência a superfícies (Leahy et al., 2010). Aderindo-se às partículas no rúmen, as metanogênicas poderão crescer a uma taxa menor, ou seja, o suficiente para manter o ritmo com a taxa de passagem dos sólidos, ao invés de se adequarem ao rápido fluxo da fase líquida. Taxa de crescimento mais lento resulta em menor concentração estacionária de  $H_2$ , o que pode aumentar a produção desse gás, pelo fato das vias de sua formação serem termodinamicamente mais favoráveis. Consequentemente, isso proporciona aumento da formação de metano. Metanogênicas que não aderem a partículas sólidas têm que crescer a uma taxa mais elevada para manterem-se no rúmen, o que pode não ser possível se as metanogênicas aderidas reduzirem a concentração de  $H_2$  a tal nível em que elevadas taxas de crescimento não sejam possíveis (Janssen, 2010).

A produção de metano por ovinos foi negativamente correlacionada com a taxa de passagem (Pinares-Patiño et al., 2003), o que pode ser explicado não só pela redução na fermentação ruminal do alimento, mas também porque taxas de passagem elevadas levam ao aumento das concentrações de  $H_2$  dissolvido, resultando em menor formação de metano e maior de propionato.

Se as *Archaea* metanogênicas são capazes de se manterem no rúmen a uma taxa de crescimento mais lenta, por meio da adesão a protozoários, então essa seria uma vantagem quando a taxa de passagem é elevada como, por exemplo, em dietas ricas em concentrado. Entretanto, essa estratégia será menos importante quando a taxa de passagem for mais baixa, quando dietas baseadas em forragem são fornecidas. Além disso, dietas baseadas em forragem proporcionam às metanogênicas muitas outras superfícies com maior tempo de retenção para que elas possam se aderir. É possível que, na presença de protozoários, metanogênicas colonizadoras possam crescer mais lentamente e então reduzir a concentração de  $H_2$  do meio, de modo que as vias de fermentação de formação de  $H_2$  são favorecidas e mais metano é produzido. Defaunação em ruminantes alimentados com dietas baseadas em grãos resultou na redução da produção de metano, mas as diferenças foram muito menores para dietas baseadas em forragem (Hegarty et al., 2008; Bird et al., 2008).

Em geral, a queda do pH ruminal está associada a taxas de passagem elevadas, menor formação de metano, aumento da proporção de propionato no total de AGVs, e maiores concentrações de  $H_2$ . Dependendo do tipo de dieta e do tempo após alimentação, o pH do líquido ruminal sob condições fisiológicas normais, varia de 5,6 a 6,7 (Kolver e Veth, 2002). Na extremidade mais ácida desse intervalo, as metanogênicas ruminais são parcialmente inibidas, e sua população é menor ou elas são menos ativas. O pH ótimo para o crescimento das metanogênicas está dentro da faixa de 6,0 a 7,5, e o limite mais baixo está entre 5,5 e 6,5. Isso significa que as taxas mais elevadas de crescimento são alcançadas nos valores de pH ruminal próximos da neutralidade, e a taxa de crescimento cairá à medida que o pH é reduzido. Consequentemente, a concentração de  $H_2$  requerida pelas metanogênicas para atingirem a taxa de crescimento necessária para manter sua



população no rúmen, em uma dada taxa de passagem, será maior quando o pH está sub ótimo. Portanto, em valores de pH mais ácidos, a concentração de H<sub>2</sub> dissolvido deve ser maior em qualquer taxa de passagem. Como consequência das elevadas concentrações de H<sub>2</sub> no rúmen quando as metanogênicas estão crescendo em condições sub ótimas, ocorre queda na produção líquida de H<sub>2</sub> pelos microrganismos fermentadores, reduzindo a formação de CH<sub>4</sub>, a qual é determinada pela quantidade de H<sub>2</sub> que passa através do *pool* de H<sub>2</sub> dissolvido no meio ruminal (Janssen, 2010).

#### *Quando inibidores de metano estão presentes*

Inibidores de metanogênicas reduzem a taxa de crescimento desses microrganismos de maneira semelhante aos efeitos do baixo pH. Geralmente, a formação de metano é apenas parcialmente inibida e maior pressão parcial de H<sub>2</sub> será necessária para que as metanogênicas mantenham qualquer taxa de crescimento. Com o aumento da concentração de H<sub>2</sub> observa-se maior formação de propionato. Tais inibidores incluem gorduras e óleos, certos extratos de plantas, óleos essenciais, taninos, entre outros. A utilização desses inibidores como estratégia de mitigação será abordada no tópico *Estratégias nutricionais de mitigação*.

Se a quantidade de inibidor presente no rúmen impede que as metanogênicas atinjam a taxa de crescimento necessária, ou seja, acima da taxa de diluição, sua população será completamente "lavada". Como consequência, a concentração de H<sub>2</sub> no rúmen atingirá níveis muito elevados (Janssen, 2010). Tal efeito é observado para o uso de hidrocarbonetos clorados, os quais praticamente cessam a produção de metano, resultam em aumento da pressão parcial de H<sub>2</sub> no rúmen, e promovem mudança acentuada para maior produção de propionato (Denman et al., 2007; Goel et al., 2009).

### **3. METANO ENTÉRICO E PERDAS ENERGÉTICAS**

Com teor energético de 55,22 MJ/kg (Brouwer, 1965), o metano representa significativa perda de energia pelo sistema de produção (Tabela 2).

Aproximadamente, 5,5 a 6,5% da energia bruta ingerida é convertida a metano (Johnson e Ward, 1996). Entretanto, mensurações realizadas em câmaras respirométricas (calorimetria indireta) mostraram grande variação na emissão de metano, de 2 a 12% da energia bruta ingerida (Johnson e Johnson, 1995). Geralmente, à medida que a digestibilidade da dieta aumenta, ocorre maior variação na produção de metano.

Segundo Johnson e Johnson (1995), existem duas causas principais para esta variação na produção de metano: quantidade de carboidratos fermentados no rúmen e proporções relativas de propionato e de acetato produzidos.

Embora seja reconhecido que a composição da dieta afeta a contribuição dos ruminantes para a produção de GEE, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, responsável pelo desenvolvimento de metodologias para estimar inventários de emissão global, apenas faz diferenciação entre duas dietas (IPCC, 2006):

- Dietas com mais 90% de concentrado: taxa de conversão de CH<sub>4</sub> de 3% da EB



ingerida e;

- Dietas com menos de 90% de concentrado: taxa de conversão de CH<sub>4</sub> de 6,5% da EB ingerida.

Tabela 2. Variações típicas nas emissões de metano por três classes de ruminantes, energia perdida como CH<sub>4</sub> e estimativa de dias perdidos de pastejo efetivo anual

Classe animal	Peso vivo médio (kg)	CH <sub>4</sub> (kg/cab/dia)	MJ de CH <sub>4</sub> perdido/cab/dia <sup>a</sup>	Exigência de energia diário (MJ/cab/dia) <sup>b</sup>	Dias perdidos de pastejo efetivo anual <sup>c</sup>
Ovino adulto	48	10-13	1,5-2,0	13	43-55
Novilho de corte	470	50-90	7,6-13,6	83	33-60
Vaca de leite	550	91-146	13,6-22,1	203	25-40

<sup>a</sup> Assumindo densidade energética de 55,22 MJ/kg de CH<sub>4</sub> (Brouwer, 1965)

<sup>b</sup> Standing Committee on Agriculture (1990)

<sup>c</sup> Dias perdidos de pastejo efetivo anual = (perda de energia/exigência diária) x 365,25

Fonte: Eckard et al. (2010)

Esse critério pode não estar condizente com as condições observadas nos sistemas de produção de ruminantes instalados no Brasil, onde dificilmente são observados níveis de inclusão de mais de 90% de concentrado na dieta e, talvez a amplitude de 0 a 90% de concentrado seja pouco específica para a maior parte do manejo adotado para o rebanho de ruminantes no país.

Avaliando a produção de CH<sub>4</sub> em novilhos de corte alimentados com dietas exclusivamente à base de forragem ou com 80% de concentrado, Harper *et al.* (1999) verificaram que 8,1 e 2,1% da energia bruta ingerida foi perdida como metano, respectivamente. Segundo Kaharabata *et al.* (2000), uma vaca leiteira pesando, aproximadamente, 600 kg pode apresentar produção total variando de 268 a 450 g de CH<sub>4</sub>, sendo a energia perdida na forma de metano (13,344 kcal/g) suficiente para produzir 4,55 e 7,65 kg de leite com 4% de gordura, respectivamente. Johnson *et al.* (1994) observaram produção de CH<sub>4</sub> de 256 L/dia em novilhos (9,1% da EB ingerida), 193,9 L/dia para novilhas (5,6% da EB) e 548,2 L/dia (5,7% da EB) para vacas em lactação.

Dentre as formas de se expressar a produção de metano entérico, é importante considerar a produção por unidade de produto animal formado (kg de leite, de carne, ou de lã). Com esta forma de expressão, pode ser estabelecido equilíbrio entre a necessidade de produção de alimento para a crescente população e a emissão de GEE, além de evitar que sistemas de produção eficientes sejam penalizados. Portanto, a redução da produção de metano entérico sem prejudicar a produtividade animal é desejável, tanto como uma estratégia de mitigar a emissão total de GEE, como também de melhorar a eficiência de conversão alimentar dos ruminantes.





A eficiência dos sistemas brasileiros é passível de melhorias, ou seja, há ainda potencial para aumentar a quantidade de produto final, mantendo ou reduzindo a emissão de GEE. Conforme estimativas realizadas por Barioni et al. (2007), o aumento da taxa de natalidade de bovinos de 55 para 68%, a redução na idade de abate de 36 para 28 meses e a redução na mortalidade até 1 ano de 7% para 4,5%, permitiria que em 2025 as emissões de metano em relação ao equivalente carcaça produzido fossem reduzidas em 18%. Isso seria possível mesmo com o aumento estimado em 25,4% na produção de carne. Ou seja, toda ação que melhore a eficiência do sistema de produção reduz proporcionalmente a emissão de metano, uma vez que mais produto (carne, leite, lã, etc.) será produzido em relação aos recursos utilizados (Guimarães Jr. et al., 2010).

Yan et al. (2010) avaliaram dados obtidos em 20 estudos de metabolismo energético, realizados em câmaras respirométricas de fluxo aberto, envolvendo 579 vacas em lactação, com variação no mérito genético, número e fase da lactação e peso vivo. Os autores estudaram as taxas de emissão de metano entérico em relação a variáveis de eficiência de utilização de energia e de produtividade animal. Os resultados indicaram que a perda de energia na forma de  $\text{CH}_4$  como proporção da energia bruta (EB) ingerida ou da energia do leite, foi negativamente relacionada aos níveis de produção leiteira, metabolizabilidade da energia (q) e eficiência de utilização da energia metabolizável para lactação ( $K_l$ ). Portanto, a seleção de vacas leiteiras com elevados níveis de produção e eficiência de utilização de energia representa estratégia eficiente de mitigação.

#### 4. ESTRATÉGIAS NUTRICIONAIS DE MITIGAÇÃO DO METANO ENTÉRICO

O composto de importância crítica para o ecossistema ruminal é o  $\text{H}_2$  produzido principalmente durante a fermentação. No rúmen, para que a degradação dos nutrientes da dieta ocorra normalmente, levando à formação de AGVs, é necessário que a pressão de  $\text{H}_2$  mantenha-se reduzida, permitindo a re-oxidação do NADH. No rúmen, esse processo ocorre por meio da metanogênese. Desta forma, a manipulação do  $\text{H}_2$  no rúmen é a chave para controlar a emissão de metano (Joblin, 1999).

De acordo com Martin *et al.* (2009a), as vias metabólicas envolvidas na formação e utilização do  $\text{H}_2$ , bem como a população metanogênica são importantes fatores que devem ser levados em consideração no desenvolvimento de estratégias para controlar a emissão de metano por ruminantes. Qualquer estratégia adotada deve ter como foco um ou mais dos objetivos listados abaixo:

- Redução da produção de  $\text{H}_2$  sem prejudicar a digestão dos alimentos;
- Estimulação da utilização do  $\text{H}_2$  por meio de vias de produção de produtos alternativos benéficos para o ruminante;
- Inibição das *Archaeae* metanogênicas (número e/ou atividade), com concomitante estímulo de vias que consomem  $\text{H}_2$  para evitar os efeitos negativos do aumento da pressão parcial de  $\text{H}_2$  no rúmen.



## 4.1 COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DA DIETA

### A. Concentrado

Sabe-se que o aumento na quantidade de concentrado na dieta reduz a proporção da energia dietética convertida para metano (Blaxter e Clapperton, 1965). Ou seja, a adição de concentrado promove redução da emissão de metano como proporção da energia ingerida ou expressa por unidade de produto animal (leite e/ou carne).

A substituição de carboidratos fibrosos (celulose e hemiceluloses) por carboidratos não fibrosos (amido e açúcares) resulta em significativas modificações nas condições físico-químicas do rúmen e população microbiana. O desenvolvimento de bactérias amilolíticas resulta em mudança na produção de AGVs, promovendo aumento da proporção de propionato e redução de acetato. Consequentemente, há queda na produção de metano devido à redução da disponibilidade de  $H_2$  no rúmen.

Entretanto, de acordo com Martin *et al.* (2009a), a baixa relação acetato:propionato nem sempre ocorre em animais alimentados com dietas ricas em concentrado. Nessas situações, a redução da emissão de metano pode ser explicada pela queda do pH ruminal e declínio do número de protozoários ciliados. O baixo pH ruminal também pode inibir o crescimento e/ou atividade das metanogênicas e bactérias celulolíticas.

Desta forma, em dietas com elevadas proporções de concentrado, os fatores que induzem a redução da produção de metano são:

- Aumento da produção de propionato, o que reduz a quantidade de  $H_2$  disponível no rúmen;
- Inibição das metanogênicas (Hegarty, 1999), das bactérias celulolíticas (Brossard *et al.*, 2004) e dos protozoários ciliados pela redução do pH ruminal;
- Produção de bacteriocinas por bactérias lácticas, que inibem a atividade das metanogênicas (Rodriguez e Campos, 2007).

As perdas de metano mostram-se relativamente constantes para dietas contendo de 30 a 40% de concentrado (6 a 7% da EB ingerida) e então decrescem rapidamente para baixos valores (2 a 3% da EB ingerida) para dietas contendo de 80 a 90% de concentrado (Lovett *et al.*, 2003; Beauchemin and McGinn, 2005; Martin *et al.*, 2007).

Berchielli *et al.* (2003) relataram comportamento quadrático para a produção de metano em bovinos de corte alimentados com diferentes relações volumoso:concentrado. De acordo com os autores, o resultado observado sugere que a adição de concentrado, em baixas quantidades, propiciou condição favorável aos microrganismos, disponibilizando energia para degradação da fração fibrosa no rúmen. No entanto, a partir da adição de 60% de concentrado na dieta, o ambiente ruminal tornou-se prejudicial aos microrganismos responsáveis pela metanogênese, evidenciado pela queda no pH. Primavesi *et al.* (2004) também relataram que a substituição de volumoso por concentrado energético resultou em emissão máxima de metano quando o concentrado



participou em 40% da matéria seca da dieta.

A adição de alimentos concentrados energéticos em dietas de ruminantes visando à redução da emissão de metano é uma estratégia que apresenta limitações econômicas e ambientais. As possíveis consequências metabólicas de dietas com elevado teor de carboidratos não fibrosos, como acidose ruminal, queda na porcentagem de gordura do leite e redução da vida produtiva dos animais devem ser levadas em consideração. A viabilidade econômica de sistemas produtivos que utilizam elevada proporção de concentrado nas dietas de ruminantes é questionável em países com clima propício à produção animal em pastagens, como o Brasil.

Além disso, as consequências do aumento da densidade energética das dietas devem ser analisadas sob visão sistêmica. A emissão de GEE, como CO<sub>2</sub> e óxido nitroso, provenientes dos processos de produção, colheita e transporte dos grãos pode superar a redução da emissão de metano entérico causada pela inclusão desses alimentos na dieta de ruminantes. Abordagens sobre o fluxo de GEE nos sistemas de produção são encontradas nos trabalhos de Johnson *et al.* (2002b) e Lovett *et al.* (2006).

Além da quantidade de concentrado na dieta, a sua composição também influencia a produção de metano. Lovett *et al.* (2006) avaliaram o efeito da suplementação do pasto com concentrado constituído primariamente de subprodutos fibrosos (32,8% de fibra insolúvel em detergente neutro - FDN), sobre a emissão de metano entérico. Foi observado aumento da produção diária de metano (de 346 para 399 g/vaca/dia) com o incremento na quantidade fornecida de concentrado, devido ao seu alto nível de fibra e baixo teor de amido. Entretanto, é importante destacar que os autores observaram tendência de redução da emissão de metano por kg de leite produzido, já que o uso do concentrado promoveu aumento de produção leiteira das vacas.

## B. Forragem

A emissão de metano (g/kg de matéria seca ingerida) é influenciada pelo tipo de volumoso que o animal está ingerindo. Animais consumindo leguminosas geralmente emitem menos CH<sub>4</sub> em relação àqueles consumindo gramíneas. De acordo com Benchaar *et al.* (2001), a substituição de feno de capim timóteo (*Phleum pratense*) por alfafa reduziu a emissão de metano em 21% (expresso como % da energia digestível). McCaughey *et al.* (1999) observaram em bovinos de corte sob pastejo, redução de 10% na produção de metano por unidade de produto, quando a dieta constituída exclusivamente por gramínea foi substituída por outra contendo alfafa e gramínea (70:30). Tal efeito da utilização de leguminosas sobre a emissão de metano é frequentemente explicado pela presença de taninos condensados (Waghorn, 2007), baixo teor de fibra, maior ingestão de matéria seca com conseqüente aumento da taxa de passagem no rúmen (O' Mara *et al.*, 2004).

Existem diferenças significativas na composição de carboidratos das forragens, o que influencia o potencial metanogênico das mesmas. Gramíneas C<sub>4</sub> podem produzir mais metano por kg de MS ingerida do que gramíneas de ciclo fotossintético C<sub>3</sub> (Archimède *et al.*, 2011; Ulyatt *et al.*, 2002). Corroborando essas informações, Primavesi *et al.* (2004), trabalhando com vacas em lactação, verificaram emissão de 121 a 147 kg de CH<sub>4</sub>/animal/ano em condições brasileiras, sendo tais valores superiores aos relatados na



América do Norte (118 kg de CH<sub>4</sub>/animal/ano para animais de 600 kg de peso corpóreo e lactação de 6.700 kg de leite/ano e ingestão de 2,7% do peso vivo de MS) e no Leste Europeu (100 kg de CH<sub>4</sub> /animal/ano para vacas de 550 kg de peso vivo, lactação de 4.200 kg de leite/ano e ingestão de 2,5% do peso vivo de MS) (IPCC 1995; Johnson & Ward, 1996). Os autores atribuíram essa diferença à pior qualidade da forragem tropical em relação à de clima temperado, especialmente pelo maior teor de fibra e menor digestibilidade. Archimède et al (2011) reportaram emissões de metano (L/kg de matéria seca ingerida) 17% superiores para ruminantes alimentados com gramíneas C4 comparado com animais que ingeriram gramíneas C3.

Outro fator determinante para a menor produção de CH<sub>4</sub> por vacas em lactação em pastagens de clima temperado é a utilização de grãos em proporção superior a 50% na dieta, a qual atende às exigências energéticas diárias com menor volume de matéria seca. O percentual de CH<sub>4</sub> produzido a partir da energia bruta ingerida é estimado entre 5,5 e 6,5% na América do Norte e Leste europeu (Estados Unidos, 1990). Primavesi *et al.* (2004) encontraram valores de 8,3% para vacas da raça holandesa em lactação, e 10,6% para as mestiças, mantidas em pastagens adubadas de capim-tobiatã (*Panicum maximum* cv. Tobiatã) e braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.), respectivamente.

Outro fator importante a ser considerado é o método de conservação e o processamento da forragem. De acordo com Beauchemin *et al.* (2008), a metanogênese tende a ser menor em silagens do que em fenos, e quando ela é finamente moída ou peletizada do que quando é grosseiramente picada. A moagem e a peletização de forragens reduzem marcadamente a metanogênese (queda de 20 a 40% da produção de metano por unidade da dieta) (Blaxter, 1989), devido ao aumento da taxa de passagem. Entretanto, tais efeitos não são aparentes quando o consumo desses alimentos é restrito. A amoniação ou a suplementação proteica de forragens de baixa qualidade aumentam a perda de metano proporcionalmente ao incremento da digestibilidade. Entretanto, a produção de metano por unidade de produto é reduzida (Johnson e Johnson, 1995).

A implementação de práticas de manejo de pastagens para melhorar sua qualidade aumenta o desempenho animal e a produtividade por unidade de área. Associado ao incremento no desempenho espera-se aumento da emissão de metano, como resultado da maior extensão da fermentação da forragem no rúmen. Entretanto, a quantidade de metano produzido por unidade de produto (leite ou carne) é reduzida se a produção ou crescimento do animal é aumentado.

Wims et al. (2010) avaliaram os efeitos de dois níveis de massa de MS de forragem pré-pastejo (baixa: 1.000 kg/ha e alta: 2.200 kg/ha) sobre a emissão de metano, CMS de forragem e produção de leite de vacas manejadas sob pastejo. A emissão de metano foi mensurada em dois experimentos por meio da técnica do gás traçador SF<sub>6</sub>, e o CMS foi estimado a partir da técnica dos *n*-alcanos. Os autores concluíram que o uso de baixa massa de forragem pré-pastejo melhorou a qualidade nutricional do pasto, com consequente redução na emissão de metano (g/dia; g/kg de leite; g/kg de sólidos do leite e g/kg de matéria seca de forragem ingerida). Tais resultados estão de acordo com Blaxter e Clapperton (1965), os quais afirmaram que, em altos níveis de consumo (duas a três vezes o nível de manutenção), a produção de CH<sub>4</sub> decresce com o aumento da digestibilidade. Portanto, embora o consumo seja o maior determinante da produção de



metano, o estudo de Wims et al. (2010) mostrou que outros fatores estão envolvidos na determinação da emissão de metano, já que produção de metano em g/kg de matéria seca de forragem ingerida diferiu entre os tratamentos.

Robertson e Waghorn (2002) observaram que a produção de metano por vacas leiteiras em pastagem aumentou com o avanço da maturidade da forragem (de 5 para 6,5% da EB ingerida, respectivamente, na primavera e verão). A menor emissão relativa de metano observada para forragens mais jovens pode ser explicada pelos maiores teores de carboidratos solúveis e também de ácido linoleico. Hegarty (2001) analisou o efeito do melhoramento da qualidade nutricional das pastagens na produção de metano por ovinos da raça Merino e verificou que a proporção da energia ingerida perdida como metano diminuiu de 6,6 para 6,0% com o aumento da digestibilidade da forragem consumida, apesar do aumento da produção diária do gás.

Assim, a implementação de adequado manejo de pastagem na propriedade aumenta a quantidade e qualidade de alimento disponível para o animal e, portanto, é estratégia adequada de mitigação de metano entérico, aumentando a eficiência de uso da energia bruta da dieta e reduzindo o impacto ambiental da pecuária. O manejo adequado de sistemas de pastejo rotacionados pode aumentar tanto a quantidade como a qualidade da pastagem disponível para os animais. Como resultado, há melhoria da eficiência alimentar, redução da produção de gás metano por hectare, e incremento no desempenho, o que aumenta a rentabilidade do sistema (Chaves et al., 2006).

#### 4.2 ADIÇÃO DE LIPÍDEOS

A suplementação de dietas com lipídeos não protegidos reduz a emissão de metano entérico. São múltiplos os mecanismos de ação dos lipídeos sobre a metanogênese:

- Redução da matéria orgânica fermentável no rúmen, já que os lipídeos não são fonte de energia para as bactérias ruminais;
- Redução da atividade das metanogênicas pela presença de ácidos graxos de cadeia média (Machmuller *et al.*, 2003)
- Efeito tóxico sobre bactérias celulolíticas (Nagajara *et al.*, 1997) e protozoários (Doreau e Ferlay, 1995) exercido por ácidos graxos poli-insaturados;
- Biohidrogenação dos ácidos graxos poli-insaturados (Johnson e Johnson, 1995).

O efeito tóxico de ácidos graxos de cadeia longa ocorre por meio da ação sobre a membrana celular, particularmente de bactérias gram-positivas. O ácido linoleico é tóxico para bactérias celulolíticas (*F. succinogenes*, *R. albus* e *R. flavefasciens*), por afetar a integridade celular, e para fungos *Neocallimastix frontalis* cultivados *in vitro* (Maia *et al.*, 2007). Tais mudanças na população microbiana ruminal favorecem a formação de propionato, aumentando a captação de H<sub>2</sub> nesse processo.

Embora a biohidrogenação dos ácidos graxos poli-insaturados resulte em captura de H<sub>2</sub>, sua influência sobre a metanogênese é baixa, já que a completa hidrogenação de 1 mol



de ácido linolênico previne a formação de apenas 0,75 mol de CH<sub>4</sub> (Martin *et al.*, 2009a). A utilização de hidrogênio metabólico no processo de biohidrogenação de ácidos graxos insaturados é pequena (1%) se comparada àquelas inerentes à redução do CO<sub>2</sub> (48%), à síntese de AGVs (33%) e à síntese de células bacterianas (12%) (Czerkawski, 1986).

A efetividade da adição de lipídeos para reduzir emissões de metano depende de vários fatores, incluindo nível de suplementação, a fonte de lipídeo utilizada, a forma de fornecimento (óleo refinado ou sementes de oleaginosas, por exemplo) e o tipo de dieta (Beauchemin *et al.*, 2008).

Embora reduções de metano maiores que 40% sejam possíveis com elevados níveis de adição de lipídeos (Machmuller e Kreuzer, 1999; Jordan *et al.*, 2006b), na prática, reduções entre 10 e 25% são as mais prováveis (Beauchemin *et al.*, 2008). Recomenda-se que a adição de lipídeo total não ultrapasse 6 a 7% da matéria seca dietética para evitar depressão do CMS. A ação múltipla da suplementação lipídica sobre o número e atividade dos microrganismos ruminais pode prejudicar o processo de digestão se o efeito tóxico sobre as metanogênicas provocar acúmulo de H<sub>2</sub> no rúmen.

Beauchemin *et al.* (2008), revisando 17 estudos com bovinos e ovinos, estabeleceram relação entre o nível de lipídeo adicionado (% do CMS) e a emissão de metano (g/kg de MS consumida) para diferentes fontes dietéticas de gorduras e óleos (Figura 1). Foi relatada redução de 5,6% na produção de metano para cada 1% de adição de lipídeo. Os autores encontraram considerável variação entre as fontes de lipídeos no efeito sobre a metanogênese. Observou-se queda acentuada na produção de metano (g/kg de MS consumida) em alguns estudos com óleo de coco (63,8% de redução com adição de 7% de gordura; Machmuller e Kreuzer, 1999) e com ácido mirístico (58,3% de redução com 5% de adição de lipídeo; Machmuller *et al.*, 2003).

Martin *et al.* (2009a) também sumarizaram dados de estudos *in vivo* (67 dietas suplementadas com lipídeos, oriundas de 28 publicações) avaliando os efeitos de diferentes fontes de lipídeos sobre a emissão de metano entérico em bovinos e ovinos. O resultado obtido foi redução média de 3,8% na emissão de metano (g/kg de MS ingerida) para cada 1% de gordura adicionada na dieta(% do CMS).

Diante do exposto, é evidente que os efeitos dos ácidos graxos sobre a metanogênese ruminal são amplamente dependentes da sua natureza. Suplementos lipídicos ricos em ácidos graxos de cadeia média (12 a 14 átomos de carbono), tais como óleos de coco, de palmáceas ou de canola (rico em ácido láurico), ou ácido mirístico purificado, são particularmente mais depressivos sobre a emissão de metano, principalmente em dietas ricas em concentrado e com baixos níveis de Ca (Machmuller *et al.*, 2003). De acordo com Dohme *et al.* (2001), os ácidos láurico (C 12:0) e mirístico (C 14:0) fornecidos sozinhos apresentam efeitos similares, mas a combinação desses dois ácidos graxos provoca efeito sinérgico, levando à queda acentuada na emissão de metano (Soliva *et al.*, 2004).

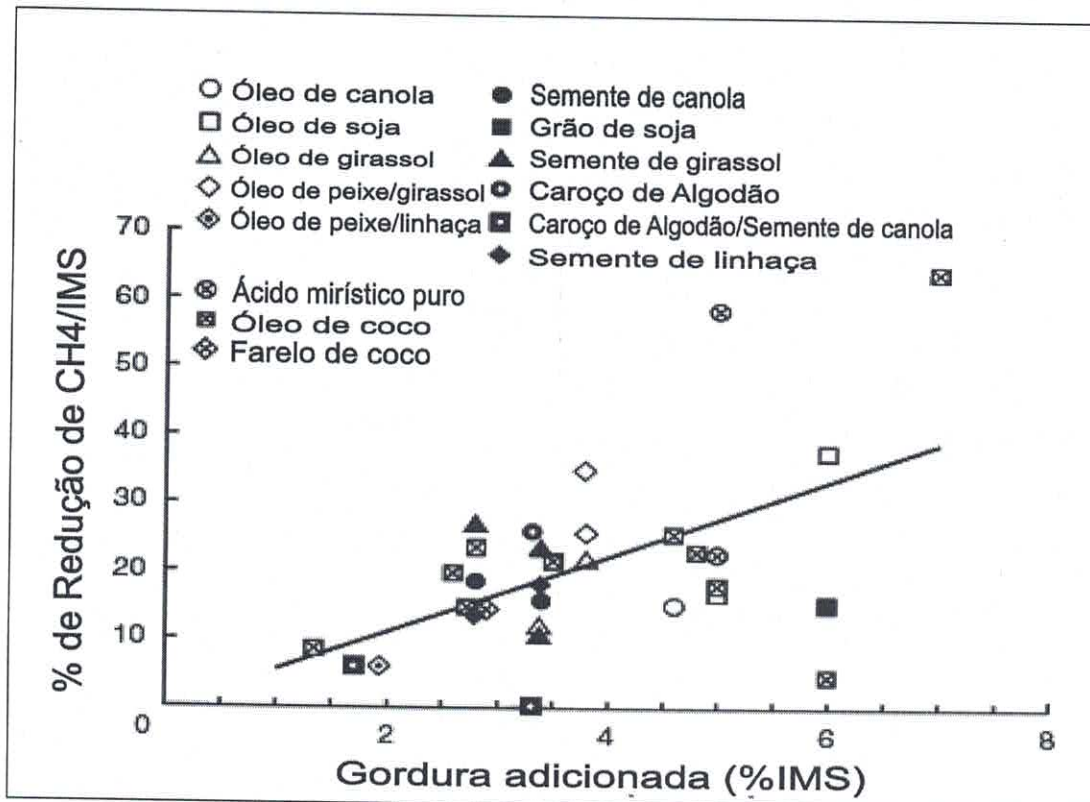


Figura 1. Sumário de dados a literatura resultantes de 33 tratamentos, mostrando o efeito da adição de diferentes fontes de lipídeos sobre a redução percentual de metano (g/kg de matéria seca ingerida) em relação às dietas controle. Fonte: Beauchemin *et al.*, (2008)

Martin *et al.* (2009a) também sumarizaram dados de estudos *in vivo* (67 dietas suplementadas com lipídeos, oriundas de 28 publicações) avaliando os efeitos de diferentes fontes de lipídeos sobre a emissão de metano entérico em bovinos e ovinos. O resultado obtido foi redução média de 3,8% na emissão de metano (g/kg de MS ingerida) para cada 1% de gordura adicionada na dieta (% do CMS).

Diante do exposto, é evidente que os efeitos dos ácidos graxos sobre a metanogênese ruminal são amplamente dependentes da sua natureza. Suplementos lipídicos ricos em ácidos graxos de cadeia média (12 a 14 átomos de carbono), tais como óleos de coco, de palmáceas ou de canola (rico em ácido láurico), ou ácido mirístico purificado, são particularmente mais depressivos sobre a emissão de metano, principalmente em dietas ricas em concentrado e com baixos níveis de Ca (Machmuller *et al.*, 2003). De acordo com Dohme *et al.* (2001), os ácidos láurico (C 12:0) e mirístico (C 14:0) fornecidos sozinhos apresentam efeitos similares, mas a combinação desses dois ácidos graxos provoca efeito sinérgico, levando à queda acentuada na emissão de metano (Soliva *et al.*, 2004).

Existem poucos estudos avaliando os efeitos de ácidos graxos mono-insaturados, como ácido oleico da canola e ácidos graxos saturados, como palmítico e esteárico do sebo,



sobre a metanogênese ruminal. Decréscimo de 30% na produção de metano foi observado quando se adicionou 12% de sebo na dieta de vacas em lactação (Van der Honing et al., 1983). Entretanto, esse efeito não foi observado em alguns estudos com vacas leiteiras (Johnson et al., 2002a; Woodward et al., 2006) e ovinos (Cosgrove et al., 2008).

Grainger et al. (2010b) avaliaram os efeitos da suplementação de dietas de vacas leiteiras com caroço de algodão por 12 semanas, sobre a metanogênese, pela técnica do gás traçador SF<sub>6</sub>. Os autores observaram redução persistente na emissão de metano (3,5 g de CH<sub>4</sub>/kg de MS ingerida, em média) ao longo de 12 semanas com a adição de caroço de algodão (2,61 kg de MS/vaca/dia). A redução observada na produção de metano (g/kg de MS ingerida), de 5,1% na primeira semana, aumentou para 14,5% na 12<sup>a</sup> semana.

Com a obrigatoriedade da inclusão de percentuais mínimos de biocombustível ao diesel, instituída pela Lei 11.097/2005 do governo brasileiro (a partir de janeiro de 2010, tornou-se obrigatório a inclusão de 5% de biodiesel ao diesel), a agricultura brasileira vem se adequando à produção de oleaginosas para fins não alimentares. Opções de matérias primas vêm sendo estudadas e utilizadas (soja, mamona, algodão, pinhão-manso, dendê, licuri, babaçu, macaúba, nabo forrageiro, amendoim, girassol, canola e côco). Uma das consequências desta nova realidade é a geração de grandes quantidades de coprodutos (farelos, tortas e glicerina), além da disponibilidade de diversos tipos de óleos que são utilizados para a produção de biodiesel, ambos com potencial para inclusão em dietas de ruminantes e, possivelmente, de contribuir com a mitigação de metano entérico.

A quantificação do potencial de mitigação da emissão de metano com o uso de coprodutos do biodiesel é importante, pois os benefícios da inclusão dos mesmos, bem como de óleos na dieta de ruminantes podem somar-se aos benefícios da utilização de biodiesel como fonte energética (redução da emissão de CO<sub>2</sub>), contribuindo para a consolidação do Brasil como referência mundial em biocombustíveis.

#### 4.3 ADITIVOS

Outra estratégia de mitigação de metano entérico é a utilização de aditivos. A manipulação do ecossistema ruminal é ferramenta bastante utilizada por nutricionistas, visando aumentar a conversão alimentar e o desempenho dos animais. No passado, as pesquisas focaram o uso de antimicrobianos como, por exemplo, a monensina. Entretanto, a crescente pressão da sociedade contra a utilização desse tipo de aditivo na alimentação animal tem incentivado a busca por métodos alternativos para manipulação do ambiente ruminal.

##### *Ionóforos*

Os efeitos anti-metanogênicos dos ionóforos estão mais relacionados com a inibição da formação dos precursores (formato e H<sub>2</sub>) do metano do que um efeito direto sobre a população de metanogênicas, uma vez que essas são mais resistentes aos ionóforos do que as bactérias que produzem e fornecem H<sub>2</sub>. A redução dos precursores de metano seria responsável por apenas 45% do efeito dos ionóforos sobre a produção de metano, sendo o restante consequência da menor ingestão de alimentos (Nagaraja et al., 1997). A





diminuição da produção de metano observada na presença de ionóforos também pode estar associada à inibição no crescimento de protozoários ciliados que, conhecidamente produzem  $H_2$  e são colonizados por metanogênicas (McAllister *et al.*, 1996).

Johnson e Johnson (1995), revisando a adição de ionóforos a dietas baseadas em grãos e forragem, encontraram grande variação quanto à redução na metanogênese ruminal (entre 4 e 31%) e concluíram que qualquer efeito é de curta duração e que o  $CH_4$  retorna a níveis normais depois de duas semanas. Eles também comentaram que a redução na produção de metano foi provavelmente relacionada à queda na ingestão de matéria seca e não ao efeito direto na metanogênese. O efeito da monensina na redução da emissão de metano é dose-dependente. Alguns estudos revisados por Beauchemin *et al.* (2008) mostraram que doses inferiores a 15 ppm não têm efeito sobre a metanogênese (g de metano/dia ou g de metano/kg de MS ingerida) em vacas leiteiras. Doses mais altas (24 a 35 ppm) reduziram a produção de metano (g/dia, em 4 a 10%; e em g/kg de MS ingerida, em 3 a 8%) por bovinos de corte e de leite (Sauer *et al.* 1998; McGinn *et al.* 2004; Van Vugt *et al.* 2005; Odongo *et al.* 2007). Reduções de 30% na emissão de metano foram reportadas quando 33 ppm de monensina foi incluída em dietas com alto ou baixo teor de forragem (Guan *et al.* 2006).

Grainger *et al.* (2010a) avaliaram o uso de dose elevada de monensina (471 mg/dia) em vacas alimentadas com pasto de azevém suplementado com 4 kg/dia de grãos de cevada. A emissão de metano foi estimada nos animais em pastejo pela técnica do gás traçador  $SF_6$  e também em câmaras respirométricas. Em ambas condições, a adição de monensina não aumentou a produção de leite e não promoveu efeito sobre a emissão de metano entérico (g/dia, g/kg de leite e g/kg de MS ingerida). Os autores concluíram que a monensina não representa estratégia de mitigação viável para vacas leiteiras em pastagem suplementadas com concentrado.

Os possíveis efeitos transitórios dos ionóforos, associado com a crescente pressão para reduzir o uso de antimicrobianos na produção animal, sugerem que essa estratégia de mitigação da emissão metano entérico por ruminantes não representa uma solução de longo prazo.

#### Ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos (malato e fumarato) representam alternativa ao uso de antimicrobianos como aditivos na alimentação de ruminantes. Essas substâncias podem estimular a captação de lactato pelas bactérias *Selenomonas ruminatum* (Martin e Park, 1996) e atuar como tampões, prevenindo quadros de acidose ruminal em dietas ricas em concentrados energéticos. Além disso, o suprimento de ácidos orgânicos, precursores diretos de propionato, tem demonstrado efeito positivo na redução da metanogênese, sendo o efeito dose-dependente (Asanuma *et al.*, 1999; O'Mara, 2004).

A utilização comercial dos ácidos orgânicos como aditivos para ruminantes é limitada, principalmente, pelo custo, podendo sua utilização não ser economicamente viável. Por essa razão, forragens podem ser fornecidas como fonte de ácidos dicarboxílicos. Os intermediários do ciclo do ácido tricarboxílico acumulam-se nos tecidos das plantas. Entretanto, de acordo com O'Mara (2004), grande variação é verificada (0,6 a 7,5% da



MS). Callaway *et al.* (1997) conduziram estudo para determinar as concentrações de malato presentes no feno de cinco variedades de alfafa, em diferentes estádios de maturação. Com o avanço da maturidade, a concentração de malato reduziu, variando de 6,5 a 7,0%, para a alfafa colhida jovem, a 2,9 a 4,5% quando colhida tardiamente. Martin (1998) sugeriu que o elevado teor de malato em forragens frescas nos estádios iniciais de crescimento, especialmente alfafa, podem promover mudanças significativas na fermentação microbiana ruminal.

#### *Extratos de plantas*

Há crescente interesse na utilização de compostos secundários de plantas como estratégia de mitigação do metano, por representar alternativa natural à utilização de aditivos químicos. Várias plantas contêm compostos secundários que as protegem do ataque de fungos, bactérias, insetos e herbívoros. O efeito dessas moléculas sobre a metanogênese ruminal é altamente variável. A maioria dos trabalhos aborda o uso de taninos, saponinas e óleos essenciais. Quando elevados níveis dessas substâncias são ingeridos podem ocorrer efeitos adversos sobre o desempenho e saúde do animal, mas, em baixas concentrações, são capazes de melhorar o processo fermentativo no rúmen (Morais *et al.*, 2006; Beauchemin *et al.*, 2008).

Os taninos são substâncias polifenólicas com variados pesos moleculares e complexidade, sendo classificados em hidrolisáveis e condensados. A atividade antimetanogênica dos taninos presentes nas plantas tem sido atribuída, principalmente, ao grupo de taninos condensados.

Vacas leiteiras apresentaram menor emissão de metano (26,9 g/kg de MS ingerida e 378 g/kg de sólidos do leite) quando alimentadas com *Lotus corniculatus* do que quando receberam silagem de azevém (35,23 g de CH<sub>4</sub>/kg de MS ingerida e 434 g de CH<sub>4</sub>/kg de sólidos do leite) (Woodward *et al.*, 2001). Oliveira *et al.* (2006), avaliando o efeito de dietas contendo silagens de sorgo com baixo e alto teor de taninos, fornecidas para bovinos de corte, não observaram efeito desses compostos sobre a metanogênese.

Saponinas são glicosídeos encontrados em muitas plantas, como *Brachiaria decumbens* e *Medicago sativa* (alfafa) e apresentam efeito direto sobre os microrganismos ruminais. As saponinas reduzem a degradação de proteínas e, ao mesmo tempo, favorecem a síntese de proteína e biomassa microbiana, dois processos que resultam em menor disponibilidade de H<sub>2</sub> para a metanogênese (Martin *et al.*, 2009a). Mas o principal mecanismo de ação antimetanogênica das saponinas está relacionado ao efeito tóxico sobre protozoários ciliados. As saponinas emulsificam os lipídeos da membrana celular dos protozoários, causando mudanças na sua permeabilidade, e morte da célula (Wallace *et al.*, 2002).

Hess *et al.* (2004) observaram decréscimo de 54% na contagem de protozoários e redução de 20% na produção *in vitro* de metano utilizando elevadas doses de saponinas (12 mg/g de MS). Guo *et al.* (2008) observaram redução na metanogênese (8%) e no número de protozoários (50%) com o uso de saponinas *in vitro*. Os autores relataram redução na atividade das metanogênicas (76%), mensurada por meio da expressão do gene *mcrA*, sem que o número de metanogênicas fosse afetado.



Óleos essenciais são metabólitos secundários, são responsáveis pelo odor e cor de algumas plantas. As pesquisas conduzidas até o momento indicam a possibilidade da utilização de óleos essenciais para manipulação da fermentação ruminal. Muitas moléculas biologicamente ativas presentes nos óleos essenciais apresentam propriedades antimicrobianas, atuando sobre bactérias Gram-positivas e Gram-negativas. Entre os óleos essenciais estudados, destaca-se o extraído do alho (*Allium sativa*) por vaporização e destilação, apresentando efeito sobre a metanogênese *in vitro*. Busquet et al. (2005) avaliaram os efeitos do óleo essencial obtido do alho e de quatro de seus componentes (diallyl sulfeto, diallyl disulfeto, allyl mercaptan e allicin) sobre a fermentação ruminal *in vitro*. A produção de metano após 17 h de fermentação foi significativamente reduzida pelo óleo essencial de alho, allyl mercaptan e diallyl disulfeto. McAllister et al. (2008) estudaram um produto de allicin disponível no mercado. Nos níveis de inclusão de 0; 2 e 20 µg/mL, o allicin não afetou a produção diária de AGVs e de nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>). Entretanto, em concentração de 20 µg/mL, a produção de metano foi significativamente reduzida, o que está relacionado à redução da população de metanogênicas em relação à população bacteriana total, avaliada por PCR.

Watabane et al. (2010) avaliaram o uso de líquido da casca da castanha de caju (CNSL), um coproduto da produção de castanha de caju em países tropicais, que apresenta várias aplicações industriais. O CNSL apresenta compostos fenólicos, destacando-se o ácido anacárdico, que inibem seletivamente bactérias Gram-positivas. Os autores realizaram uma série de experimentos *in vitro* utilizando dietas ricas em concentrado (V:C; 30:70), para avaliar os efeitos de diferentes doses de CNSL cru e termicamente processado. Os resultados obtidos indicam que o CNSL cru pode ser uma alternativa de manipulação ruminal, aumentando a produção de propionato e reduzindo a emissão de metano.

#### 4.4 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO VIA ROTAS ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DO H<sub>2</sub>

Uma das estratégias de mitigação de metano é o redirecionamento do H<sub>2</sub> para processos que geram produtos benéficos para os ruminantes. Exemplos incluem a adição à dieta de substratos que estimulam a produção de propionato e tentativas de introduzir bactérias que expressam acetogênese redutiva no rúmen. Esses processos levam à produção de propionato e acetato, respectivamente, e reduzem a disponibilidade de H<sub>2</sub> para a metanogênese (van Zijderveld et al., 2010). O uso de sais de nitrato ou sulfato também tem sido avaliado como estratégia de mitigação de metano entérico, por também representar via alternativa de utilização do H<sub>2</sub>.

##### *Probióticos acetogênicos*

Em algumas espécies com fermentação pós-gástrica (humanos, *hamster*, coelho, rato) a acetogênese redutiva é um mecanismo natural de utilização do H<sub>2</sub> no trato gastrointestinal. Sabe-se que a acetogênese também acontece no rúmen, mas sua capacidade "hidrogeniotrófica" e significância ecológica não são bem compreendidas (Mackie e Bryant, 1994).

O primeiro microrganismo ruminal acetogênico reconhecido, *Eubacterium limosum*, foi



isolado em ovinos alimentados com dieta à base de melaço (Gethner *et al.*, 1981). Foi então demonstrado sua capacidade de crescer em meio com CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, e produzir acetato. A dificuldade de isolar acetogênicos (Braun *et al.* 1979) indicaram que esses microrganismos não eram habitantes naturais do rúmen e a acetogênese não foi considerada processo ruminal relevante. Entretanto, com o aumento das discussões sobre o papel do metano no aquecimento global, a acetogênese passou a ser vista como potencial estratégia de mitigação da emissão de metano entérico.

Além disso, o produto final dessa reação, o acetato, tem a vantagem adicional de ser fonte de energia para o animal hospedeiro. Entretanto, no ambiente ruminal a acetogênese é menos eficiente do que a metanogênese na competição por equivalentes redutores. A acetogênese precisa de concentração de H<sub>2</sub> mais elevada no meio para reduzir CO<sub>2</sub> a acetato, do que aquela necessária pelas metanogênicas para reduzir CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. Além disso, a última reação é termodinamicamente mais favorável (Weimer, 1998).

Recentes estudos indicaram que todos os ruminantes apresentam pelo menos uma pequena população de bactérias acetogênicas e que sua densidade é influenciada pela dieta. Sugere-se que a presença de acetogênicas no rúmen seja um mecanismo de defesa para se evitar acúmulo de H<sub>2</sub> em casos de inibição da metanogênese, ou seja, esses microrganismos provavelmente não atuam no rúmen competindo com as metanogênicas (Hegarty, 2001). Bactérias acetogênicas estão presentes em grande número no rúmen de bezerras recém-nascidos, antes do estabelecimento da metanogênese (Morvan *et al.*, 1994), e em bovinos alimentados com dietas com baixa relação volumoso:concentrado (Leedle e Greening, 1988). O recente isolamento de novas espécies oriundas do trato gastrointestinal de diversas espécies com maior afinidade pelo H<sub>2</sub> (Klieve e Joblin, 2007) representa nova perspectiva para essa estratégia de mitigação.

#### *Sais de nitrato ou de sulfato*

O uso do nitrato como alternativa de utilização do H<sub>2</sub> tem sido mal visto devido aos possíveis efeitos tóxicos do nitrito, composto intermediário formado na redução do nitrato a amônia. A redução de nitrato a nitrito ( $\Delta G_T = -130$  kJ/mol de H<sub>2</sub>) e subsequente redução do nitrito a amônia ( $\Delta G_T = -124$  kJ/mol de H<sub>2</sub>) libera mais energia do que a redução do CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> ( $\Delta G_T = -16,9$  kJ/mol de H<sub>2</sub>) (Ungerfeld e Kohn, 2006). Esse processo poderia ser a principal rota de eliminação do H<sub>2</sub> se suficiente quantidade de nitrato estivesse disponível no ecossistema ruminal ativo. A redução de nitrato a amônia consome oito elétrons e cada mol de nitrato reduzido, podendo então diminuir a produção de metano em 1 mol. A amônia produzida estaria disponível para processos anabólicos e seria importante fonte de N fermentável em dietas deficientes em proteína bruta, nas quais as baixas concentrações de amônia ruminal limitam a síntese de proteína microbiana (van Zijderveld *et al.*, 2010).

Em animais não adaptados ao uso de nitrato na dieta, a capacidade dos microrganismos ruminais reduzirem nitrato a nitrito excede a capacidade de redução do nitrito. Esse composto é então absorvido pelo epitélio ruminal e converte a hemoglobina sanguínea da forma ferrosa (Fe<sup>2+</sup>) para a férrica (Fe<sup>3+</sup>), tornando a molécula incapaz de transportar O<sub>2</sub> para os tecidos (metahemoglobinemia). A condição resultante é um estado geral de anoxia, que pode reduzir o desempenho animal e, nos casos mais severos, ser fatal



(Ozmen et al., 2005). A suplementação com enxofre ou cisteína pode reduzir o acúmulo de nitrito no rúmen. O sulfato também é redutor ( $\Delta G_T = -21,1$  kJ/mol de  $H_2$ ) e também competirá por elétrons, podendo reduzir a produção de metano (Ungerfeld e Kohn, 2006).

Van Zijderveld et al. (2010) avaliaram os efeitos da adição de nitrato e/ou de sulfato na dieta de ovinos (2,6% da matéria seca) sobre a emissão de metano, em câmaras respirométricas. A produção de metano foi reduzida com o uso dos suplementos (nitrato: -32%; sulfato: -16%; nitrato + sulfato: -47%). A redução na emissão de metano devido ao uso de nitrato foi mais pronunciada no período imediatamente após a alimentação, enquanto que a redução na metanogênese devido ao sulfato foi observada durante todo o dia. Os autores concluíram que, quando fornecidos de forma segura, os sais de nitrato e de sulfato são agentes potentes de mitigação de metano entérico.

#### 4.5 VACINAÇÃO CONTRA METANOGÊNICAS RUMINAIS

A eficácia da vacinação depende da ligação de anticorpos salivares à superfície das metanogênicas, o que resulta em inativação ou remoção das mesmas do rúmen. Portanto, o alvo primário da vacina é provavelmente proteínas de superfície ou aquelas associadas à membrana, presentes universalmente nas metanogênicas (Buddle et al., 2010). Essa estratégia envolve a vacinação dos animais para induzir expressiva produção de anticorpos salivares, que são liberados para o rúmen, a fim de neutralizar as metanogênicas ou reduzir a emissão de metano.

Cook et al. (2008) utilizaram a técnica de imunização passiva, utilizando gema de ovo de galinha como fonte rápida, econômica e não invasiva de produção de anticorpos (IgY), a partir da imunização das aves com vacinas preparadas de células íntegras de três cepas de metanogênicas ruminiais. Os autores observaram que a adição de elevados níveis de anticorpos aviários (IgY) reduziu a produção de metano em culturas de líquido ruminal *in vitro*. Entretanto essa resposta não foi permanente, o que os autores atribuíram à possível instabilidade dos anticorpos no fluido ruminal, ou à presença de metanogênicas não cultivadas no preparo da vacina, não sendo, portanto, afetadas pelos anticorpos IgY.

Grande parte das metanogênicas ruminiais não podem ser cultivadas em laboratório (Wright et al., 2006) e, portanto, é possível que essas cepas não-cultiváveis cresçam para substituir as metanogênicas, contra as quais os anticorpos têm sido gerados (McAllister et al., 2008). A diversidade das metanogênicas no rúmen pode ser influenciada tanto pela dieta como pela localização geográfica (Wright et al., 2007), o que aumenta o desafio de desenvolver vacinas de amplo espectro contra metanogênicas, que sejam efetivas em diferentes condições de produção animal e em regiões geograficamente distintas.

Wright et al. (2004), avaliando a imunização de ovinos com preparado de células íntegras de três metanogênicas, observaram redução de 7,7% na emissão de metano. Entretanto, quando o estudo foi repetido com uma mistura de cinco metanogênicas, a vacinação não promoveu mitigação, embora tenha provocado mudança na composição da fauna microbiana no rúmen (Williams et al., 2009). Esse resultado enfatiza a dificuldade de produzir vacinas efetivas para reduzir a emissão de metano entérico, a partir em preparados de células inteiras (Buddle et al., 2010).



O desenvolvimento de vacinas recombinantes contra proteínas da superfície celular, presentes em ampla gama de espécies de metanogênicas pode melhorar a eficácia da vacinação como método de mitigação de metano entérico (McAllister et al., 2008). Buddle et al. (2010) propuseram o desenvolvimento de vacinas contra proteínas que são cruciais para o crescimento das metanogênicas e/ou para a metanogênese, e que apresentam reação cruzada para várias espécies, por meio de informações obtidas do sequenciamento genético da *M. ruminantium*.

#### 4.6 BACTERÍOFAGOS E BACTERIOCINAS

Estratégias de controle biológico, tais como bacteriófagos e bacteriocinas, podem ser efetivas na inibição direta das *Archaea* metanogênicas e redirecionamento do H<sub>2</sub> para bactérias ruminais redutivas, como as produtoras de propionato ou acetogênicas (McAllister et al., 2008).

Os bacteriófagos estão presentes em todos os ecossistemas biológicos e sua habilidade de penetrar e, subsequentemente, "lisar" a célula hospedeira faz dos bacteriófagos e seus genes, potenciais estratégias de mitigação (Buddle et al., 2010). Apenas seis *Archaeal* fagos foram sequenciados e descritos até o momento, e apenas dois são de metanogênicas: *Methanobacterium* phages psi M1 e M2, e *Methanothermobacter* phage psi M100 (Pfister et al., 1998; Luo et al., 2001). O rápido mecanismo de adaptação dos microrganismos aos fagos representa desafio ao uso dessa estratégia, e maior número de fagos precisa ser identificado, os quais devem ser sequenciados e caracterizados para que sua utilização seja eficaz (Buddle et al., 2010). Os fagos são altamente hospedeiro-específicos, o que representa outro fator limitante ao uso dessa estratégia para redução da emissão de metano, já que, aparentemente, há elevada diversidade de metanogênicas no rúmen (Janssen e Kirs, 2008; McAllister et al., 2008).

Bacteriocinas são peptídeos bactericidas produzidos por bactérias e podem desempenhar importante papel na competição entre espécies de microrganismos por nichos dentro do ecossistema ruminal (McAllister et al., 2008). Entretanto, há pouca informação sobre seus efeitos sobre a metanogênese. Nisina, uma bacteriocina exógena produzida pelo *Lactococcus lactis* tem sido estudada como estratégia de mitigação de metano. Sar et al. (2005) avaliaram os efeitos de diferentes concentrações de nisina sobre a produção *in vitro* de metano por microrganismos ruminais em sistema de cultura contínua. Com o aumento da concentração de nisina de 5 para 30 µmol/L, a produção de metano reduziu de 14 para 40%. A bacteriocina bovina HC5 produzida pelo *Streptococcus bovis* inibiu em até 50% a metanogênese *in vitro* (Lee et al., 2002).

A identificação de bacteriocinas estáveis no ambiente ruminal e específicas contra metanogênicas representa área para futuras pesquisas. São também necessários estudos *in vivo* para estabelecer a adaptabilidade e efetividade em longo prazo para o uso de bacteriocinas como aditivos alimentares (Boadi et al., 2004; McAllister et al., 2008).

#### 4.7 MANEJO DE PASTAGENS E SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

No Brasil, a maior parte das emissões de metano de origem entérica é proveniente de bovinos criados extensivamente (Lima, 2002) em pastagens que, em grande proporção,



encontram-se degradadas. Esse cenário gera ineficiência ao processo produtivo, ocasionando maiores emissões de metano por unidade de produto de origem animal produzido (Guimarães Jr. et al., 2010). Dentre as alternativas para mitigação de GEE pela pecuária destacam-se a melhoria da qualidade nutricional da dieta, pela utilização de forragens de melhor valor nutritivo, associadas ao manejo adequado da pastagem (DeRamus et al., 2003; Lassey, 2007).

O investimento na recuperação de pastagens degradadas seria outra estratégia mitigadora de impacto. De acordo com o relatório da FAO (2006), as pastagens (nativas e cultivadas) representam a segunda maior fonte potencial global de sequestro de carbono (C), com capacidade de drenar da atmosfera 1,7 bilhão de toneladas por ano, ficando atrás somente das florestas, cuja capacidade estimada chega a 2 bilhões de t de C por ano. O uso de práticas de manejo adequadas em pastagens, sobretudo de reposição da fertilidade do solo, possibilita o acúmulo de C no solo a uma taxa de 0,3 t de C/ha/ano (IPCC, 2000), o que corresponde, aproximadamente, à mitigação de 1,1 t de CO<sub>2</sub>-equivalente/ha/ano. Esse valor, bastante conservador, seria suficiente para anular cerca de 80% da emissão anual de metano de um bovino de corte adulto, estimada em 57 kg (IPCC, 1996), que equivale a 1,42 t de CO<sub>2</sub> (57 kg de CH<sub>4</sub>/ano x 25 potencial de aquecimento global do gás = 1,42 t de CO<sub>2</sub>-Eq). Portanto, pastagens produtivas e manejadas adequadamente, além de propiciarem condições favoráveis para aumentos significativos no desempenho animal e índices zootécnicos, também podem absorver grande parte do carbono emitido pela atividade pecuária, tornando-se componente importante no balanço de GEE (Guimarães Jr. et al., 2010).

Áreas de pastagens bem manejadas podem ser importantes sítios de acúmulo de carbono no solo. Ao mesmo tempo, essas pastagens podem suportar taxas de lotação de bovinos de 1 a 3 UA/ha, com produtividade entre 300 e 1.000 kg de ganho de peso/ha/ano, de forma sustentável. A recuperação de pastagens degradadas é uma opção que não somente permite a retomada da produtividade animal, mas também mantém a integridade química e física do solo, com o simultâneo aumento dos estoques de carbono no solo (Boddey et al., 2001).

Atualmente, a integração lavoura-pecuária (iLP) tem sido reconhecida como alternativa para redução das emissões de GEE pela agropecuária. O governo brasileiro incorporou a iLP na sua proposta apresentada na 15ª Reunião da Conferência das Partes (COP 15), do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, como uma das atividades mitigadoras nacionalmente aplicáveis (NAMAs) para redução de suas emissões de GEE. O governo se comprometeu a implantar essa tecnologia em 4 milhões de hectares, com impacto esperado de redução da ordem de 18 a 22 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>Eq até o ano de 2020. Além disso, faz parte da proposta, recuperar 15 milhões de ha de áreas de pastagens degradadas, o que reduziria de 83 a 104 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>Eq. Portanto, espera-se que nos próximos anos seja crescente o incentivo à adoção da iLP no país por meio de políticas públicas de crédito e de fomento (Guimarães Jr. et al., 2010).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A emissão de metano por ruminantes é consequência dos processos fermentativos gastrintestinais, que garantem a estes animais a habilidade de transformar alimentos



grosseiros, ricos em celulose, em alimentos (leite e carne) e produtos fundamentais para a evolução e desenvolvimento da humanidade.

O levantamento do potencial de emissão de metano pelos diferentes sistemas agropecuários, bem como a avaliação de estratégias de mitigação, deve ser realizado sob visão holística, levando-se em consideração a dinâmica e o balanço de carbono em todo o sistema de produção.

Existem diversas estratégias nutricionais para mitigação de metano entérico sendo estudadas e desenvolvidas. Todas apresentam diferentes viabilidades, custos e possibilidades de aceitação pelos produtores. A escolha de qual ou quais adotar deve ser baseada na capacidade de redução das emissões, associada à viabilidade econômica de adoção e manutenção ou melhoria do desempenho animal.

O incremento nos índices zootécnicos, passíveis de serem atingidos com melhorias nos sistemas de produção (principalmente os relacionados ao uso eficiente das pastagens), associado às boas práticas de manejo nutricional, sanitário e reprodutivo, são estratégias importantes para a consolidação do Brasil como produtor de alimento para o mundo, respeitando as demandas relacionadas ao uso da terra e da água, à conservação da biodiversidade e à emissão de GEE.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asanuma, N., Iwamoto, M., Hino, T., 1999. Effect of the addition of fumarate on methane production by ruminal microorganisms in vitro. *J. Dairy Sci.* 82, 780–787.

Attwood, G.T., Altermann, E., Kelly, W.J., Leahy, S.C., Zhang, L., Morrison, M. 2011. Exploring rumen methanogen genomes to identify targets for methane mitigation strategies. *Animal Feed Science and Technology.* v.166-167, p. 6575.

Attwood, G. T., Kelly, W. J.; Altermann, E. H. and Leahy, S. C. 2008. Analysis of the *Methanobrevibacter ruminantium* draft genome: understanding methanogen biology to inhibit their action in the rumen. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 83-88.

Archimède, H., Eugène, M., Marie Magdeleine, C., Boval, M., Martin, C., Morgavi, D.P., Lecomte, P., Doreau, M. 2011. Comparation of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Animal Feed Science and Tecnology.* v.166-167, p. 59-64.

Axelsson, J. 1949. The amount of produced methane energy in the European metabolic experiments with adult cattle. *Ann. R. Agric. Coll. Sweden.* 16:404-419.

Bannink, A., Kogut, J.; Dijkstra, J.; France, J.; Kebreab, E.; Van Vuuren, A. M., Tamminga, S. 2006. Estimation of the stoichiometry of volatile fatty acid production in the rumen of lactating cows. *J. Theor. Biol.* 238, 36-51

Barioni, L. G.; Lima, M.A. de; Zen, S.; Guimarães Júnior, R.; Ferreira, A. C. Abaseline projection of methane emissions by the Brazilian beef sector: preliminary results. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2007,





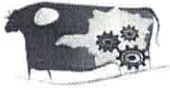
VI SIMPÓSIO MINEIRO E I SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE  
NUTRIÇÃO DE GADO DE LEITE  
13 a 15 de abril de 2012



- Christchurch, New Zealand. *Proceedings...* Christchurch: [s.n.], 2007.
- Bell, M.J., Wall, E., SIMM, G., RUSSEL, G. 2011. Effects of genetic line and feeding system on methane from dairy systems. *Animal Feed Science Technology*, 166-167, p. 699-707.
- Benchaar C, Pomar C and Chiquette J 2001. Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants: a modelling approach. *Canadian Journal of Animal Science* 81, 563–574.
- Berchielli, T.T.; Pedreira, M.S.; Oliveira, S.G; Primavesi, O.; Lima, M.; Frigueto, R.T.S. Determinação da produção de metano e pH ruminal em bovinos de corte alimentados com diferentes relações volumoso:concentrado. Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia, 40, 2003. Santa Maria. *Anais...* Santa Maria, SBZ, 2003, CD-ROM.
- Beauchemin KA, Kreuzer M, O'Mara F and McAllister TA 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 21–27.
- Beauchemin KA e McGinn SM 2005. Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets. *Journal of Animal Science* 83, 653–661.
- Bird, S. H.; Hegarty, R. S.; Woodgate, R.; 2008. Persistence of defaunation effects on digestion and methane production in ewes. *Aust. J. Exp. Agric.* 48, 152-155.
- Blaxter, K. L. 1989. *Energy Metabolism in Animals and Man*. Cambridge University Press, New York.
- Blaxter, K. L., & Clapperton, J.L. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition*, 19: 511-522, 1965.
- Boadi, D.; Benchaar, C.; Chiquette, J. Massé, D. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. 2004. *Canadian Journal of Animal Science*, 830, 319-335
- Braun, M., Schoberth, S., and Gottschalk, G. (1979). Enumeration of bacteria forming acetate from H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in anaerobic habitats. *Archives for Microbiology* 120, 201.4.
- Brossard L, Martin C, Chaucheyras-Durand F and Michalet-Doreau B 2004. Protozoa at the origin of butyric and non-lactic latent acidosis in sheep. *Reproduction Nutrition Development* 44, 195–206.
- Brouwer, E. 1965. Report of subcommittee on constants and factors. In: Blaxter, K. L (Ed.). *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Symposium on energy Metabolism*. Academic Press, London, pp. 441-443.
- Buddle, B. M., et al. 2010. Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pasture. *The Veterinary Journal*, doi:10.1016/j.tvjl.2010.02.019



- Busquet M., Calsamiglia S., Ferret A., Carro M.D. and Kamel C. 2005. Effect of garlic oil and four of its compounds on rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science* 88, 4393–4404.
- Callaway, T.R., Martin, S.A., Wampler, J.L., Hill, N.S., Hill, G.M., 1997. Malate content of forage varieties commonly fed to cattle. *J. Dairy Sci.* 80, p. 1651–1655.
- Chaves, A. V.; Thompson, L. C.; Iwaasa, A. D. 2006. Effect of pasture type (alfafa vs. grass) on methane and carbon dioxide production by yearling beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*.86, 409-418
- Cook, S. R.; Maiti, P. K.; Chaves, A. V. et al. 2008. Avian (IgY) anti-methanogen antibodies for reducing ruminal methane production: *in vitro* assessment of their effects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48: 260-264.
- Cord-Ruwisch, R.; Sietz, H. J.; Conrad, R., 1988. The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of terminal electron acceptor. *Arch. Microbiol.* 149, 350-357.
- Cosgrove GP, Waghorn GC, Anderson CB, Peters JS, Smith A, Molano G and Deighton M 2008. The effect of oils fed to sheep on methane production and digestion of ryegrass pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 189–192.
- Cotton, W.R.; Pielke, R.A. *Human impacts on weather and climate*. Cambridge: Cambridge University, 1995, 288p.
- Czerkawski, J. W. 1969. Methane production in ruminants and its significance. *World Rev. Nutr. Diet.* 11, 240-282
- Czerkawski, J. W., 1986. Degradation of solid feeds in the rumen: spatial distribution of microbial activities and its consequences. In: Milligan, L. P., Grovum, W. L., Dobson, A. (Eds). *Control of digestion and Metabolism in ruminants*. Prentice-Hall, Englewood /cliffs, N. J. USA, pp. 158-172.
- DeRamus, H.A.; Clement, T.C.; Giampola, D.D.; Dickson, P.C. Methane emissions of beef cattle on forrages: efficiency of grazing management systems. *Journal of Environment Quality*, n.32, p.269-277, 2003.
- Denman, S. E.; Tomkins, N. W.; McSweeney, C. S.; 2007. Quantitative and diversity analysis of ruminal methanogenic populations in response to antimethanogenic compound bromochloromethane. *FEMS Microbiol. Ecol.* 62, 313-322.
- Dohme F, Machmu"ller A, Wasserfallen A and Kreuzer M 2001. Ruminal methanogenesis as influenced by individual fatty acids supplemented to complete ruminant diets. *Letters in Applied Microbiology* 32, 47–51.
- Doreau M and Ferlay A 1995. Effect of dietary lipids on nitrogen metabolism in the rumen: a review. *Livestock Production Science* 43, 97–110.



- Eckard, R. J.; Grainger, C.; Klein, C.A.M. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*, 130: 47-56.
- Ellis, J. L. K.; Kebreab, N. E.; Odongo, B. W., McBride, E. K. et al. 2007. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *J. Dairy Sci.* 90:3456-3466.
- Ellis, J. L.; Dijkstra, J.; Kebreab, E.; Bannink, A.; Odongo, N. E.; McBride, B. W.; France, J. 2008a. Aspects of rumen microbiology central to mechanistic modeling of methane production in cattle. *J. Agric. Sci. Camb.* 146, 212-233.
- Estados Unidos. Environmental Protection Agency. Greenhouse gas emissions from agricultural systems. In: WORKSHOP ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM AGRICULTURE, 1989, Washington. Proceedings. Washington: United States Environmental Protection Agency, 1990. v.1, p.VII-3-VII-22. Summary report.
- Eun, J.S.; Fellner, V.; Gumpertz, M.L. Methane production by mixed ruminal cultures incubated in dual-flow fermentors. *Journal of Dairy Science*, Savoy, v.87, p.112-121, 2004.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO statistical databases. Rome, 2006. Disponível em <http://faostat.fao.org>. Acesso em 4 de junho de 2010.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO statistical databases. Rome, 2006. Disponível em <http://faostat.fao.org>. Acesso em 06 de março de 2012.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture. Livestock in the balance, Roma: FAO, 2009. 166p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/012/i0680e/i0680e.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2010.
- Genthner, B. R. S., Davis, C. L., and Bryant, M. P. (1981). Features of rumen and sludge strains of *Eubacterium limosum*, a methanol and H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-utilising species. *Applied and Environmental Microbiology* 42, 12.19.
- Goel, G.; Makkar, H. P. S.; Becker, K.; 2009. Inhibition of microbial methanogens by bromochloromethane: effects on microbial communities and rumen fermentation using batch and continuous fermentations. *Br. J. Nutr.* 101, 1484-1492.
- Grainger, C.; Clarke, T.; McGinn, S. M.; Auldist, M. J.; Beauchemin, K. A.; Hannah, M. C.; Waghorn, G. C.; Clark, H.; Eckard, R. J. 2007. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer and chamber techniques. *Journal of Dairy Science*. 90, 27455-2766.
- Grainger, C., Williams, R.; Eckard, R. J. Hannah, M. C. 2010a. A high dose of monensina does not reduce methane emissions of dairy cows offered pasture supplemented with grain. *Journal of Dairy Science*, 93:5300-5308.
- Grainger, C.; Williams, R.; Clarke, T. et al. 2010b. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. *Journal of Dairy Science*, 93:2612-2619



Guan H, Wittenberg KM, Ominski KH, Krause DO (2006) Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane. *Journal of Animal Science* 84, 1896–1906. doi: 10.2527/jas.2005-652

Guimarães Júnior, R.; Marchao, R. L.; Vilela, L.; Pereira, L. G. R. Produção animal na integração lavoura-pecuária. In: Simpósio Mineiro de Nutrição de Gado de Leite, 5., 2010, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2010. p. 111-123.

Guo YQ, Liu JX, Lu Y, Zhu WY, Denman SE and McSweeney CS 2008. Effect of tea saponin on methanogenesis, microbial community structure and expression of *mcrA* gene, in cultures of rumen micro-organisms. *Letters in Applied Microbiology* 47, 421–426.

Harper, L. A.; Denmead, O.T.; Freney, J.R.; Byers, F.M. Direct measurements of methane emissions from grazing and feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, v.77, p.1392–1401, 1999.

Hegarty R. S. 1999. Reducing rumen methane emissions through elimination of rumen protozoa. *Australian Journal of Agricultural Research* 50, 1321–1327.

Hegarty, R. *Greenhouse gas emissions from the Australian livestock sector what do we know, what can we do?* Canberra, NSW Agriculture Australian Greenhouse Office, 2001. 35p

Hegarty, R. S.; Bird, S. H.; Vanselow, B. A.; Woodgate, R.; 2008. Effects of the absence of protozoa from birth or from weaning on the growth of microorganisms. *Biotechnol. Bioeng.* 99, 833-858.

Hess, H. D., Beuret, R. A., Lotscher, M., Hindrichsen, I. K., Machmuller, A., Carulla, J. E., Lascano, C. E. and Kreuzer, M. 2004. Ruminant fermentation, methanogenesis and nitrogen utilization of sheep receiving tropical grass hay-concentrate diets offered with *Sapindus saponaria* fruits and *Cratylia argentea* foliage. *Animal Science* 79, 177–189.

Holter, J. B., Young, A. J. 1992. Methane prediction in dry and lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 75, 2165-2175.

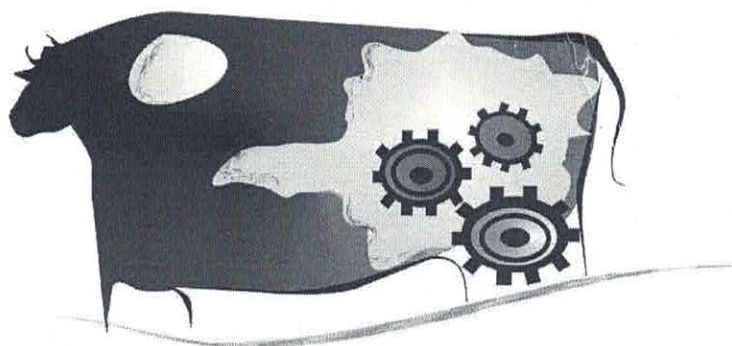
Hungate, R. E.; Smith, W.; Bauchop, T., Yu, I. Rabinowitz, J. C., 1970. Formate as an intermediate in the rumen fermentation. *J. Bacteriol.* 102, 384-397.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006. Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 777p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/default.php>. Acesso em: 05 fev. 2010.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios.* Cambridge: University Press, 1995. 339p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Emissions from livestock and manure management. In: Eggleston, H. S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tabane, K. (eds). *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories.* Hayama: IGES, 2006.

# VI SIMPÓSIO MINEIRO E I SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE NUTRIÇÃO DE GADO DE LEITE



**Belo Horizonte – MG  
13 a 15 de abril de 2012  
Escola de Veterinária da UFMG**

Lúcio Carlos Gonçalves  
Diogo Gonzaga Jayme  
Ana Luiza Costa Cruz Borges  
Iran Borges  
Pedro Dias Sales Ferreira  
Otaviano de Souza Pires Neto  
Diego Soares Gonçalves Cruz

**EDITORES**



Fundação de Ensino e Pesquisa em Medicina Veterinária e Zootecnia  
Belo Horizonte, 2012



VI SIMPÓSIO MINEIRO E I SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE  
NUTRIÇÃO DE GADO DE LEITE  
13 a 15 de abril de 2012



**Impressão:** Visual Artes Gráficas ([www.visualartesgraficas.com.br](http://www.visualartesgraficas.com.br))

**Capa:** Lucas Braga Pereira de Avelar Tonelli, Wilson Gonçalves de Faria Júnior

**1ª Edição**

Copyright © Lúcio Carlos Gonçalves

1ª impressão (2012): 500 exemplares

**Editora:** FEPMVZ

Todos os direitos reservados: a reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

S612a Simpósio Mineiro de Nutrição de Gado de Leite (6. : 2012 : Belo Horizonte, MG)  
Anais / Editores: Lúcio Carlos Gonçalves... [et al.]. - Belo Horizonte:  
FEPMVZ Editora, 2012.  
231 p. : il.

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-87144-47-8

Outros editores: Diogo Gonzaga Jayme, Ana Luiza Costa Cruz Borges, Iran Borges, Pedro Dias Sales Ferreira, Otaviano de Souza Pires Neto, Diego Soares Gonçalves Cruz.

Realizado durante o I Simpósio Nacional Sobre Nutrição de Gado de Leite

1. Bovino de Leite - Alimentação e rações - Congressos. 2. Nutrição animal - Congressos. I. Gonçalves, Lúcio Carlos. II. Simpósio Nacional Sobre Nutrição de Gado de Leite (1. : 2012 : Belo Horizonte, MG.). III. Título.

CDD – 636.214 085 200 63

O conteúdo dos artigos contidos nesta publicação é de inteira responsabilidade dos respectivos autores.