

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Serment A., Broudiscou L. 2011. *Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants*. INRA Prod. Anim., 24 (5), 433-446.

## RESUMEN DE SU LECTURA

Este artículo presenta los procesos digestivos y fermentativos que conducen a la producción de metano. Se cuantifica la influencia de estos factores sobre las principales fermentaciones de los alimentos y la producción de metano asociada.

En los últimos años hay una preocupación "exponencial" para el metano y el rumiante como principal causante. Este artículo trata de **prever con acierto la producción de metano en los rumiantes**.

Los estudios in vitro permiten determinar rápidamente la producción de metano para diversas y variadas raciones, y los balances de C, H, N, y ácidos grasos volátiles (AGV) producidos. Pero todo esto se debe validar *in vivo*, y esto sólo se consigue, hasta ahora, con cámaras aisladas. Las actuales bases de datos permiten estudios de recopilación, a pesar de la heterogeneidad de las pruebas.

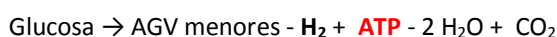
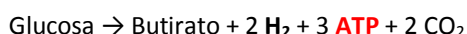
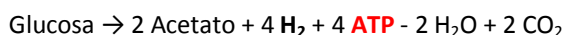
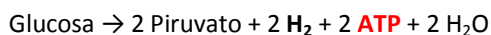
## PRINCIPALES VÍAS DE DEGRADACIÓN DELS POLÍMEROS GLUCÍDICOS.

Los principales polímeros (celulosa, hemicelulosa, almidón, etc.) se degradan en moléculas simples, oligosacáridos, y monosacáridos de 5 a 6 átomos de carbono (C). A continuación ya hablamos de la glucosa. Los monosacáridos son metabolizados en las células microbianas (glucólisis) resultando moléculas 3C, como el ácido pirúvico (cruce metabólico). A partir del ácido pirúvico, varias vías de fermentación pueden ocurrir en el rumen, lo que lleva principalmente a la formación de ácidos grasos volátiles (AGV): ácido acético (C2), ácido propiónico (C3) y butírico (C4). Otros AGV, menores, se sintetizan. Tienen 4 (iso-butírico), 5 (Valerico, isovalérico) o 6 (caproico) átomos de carbono, los cuales se combinan en una sola molécula de 5 átomos de carbono o 5,5 de media.

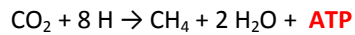
También se forma lactato y se acumula en cantidades muy pequeñas, de manera transitoria después de las comidas, excepto en el caso de situaciones de acidosis aguda.

Estas diferentes vías de degradación y fermentación se asocian con la síntesis y/o uso de los portadores de hidrógeno molecular (designado por  $H_2$  ligado a su portador), de energía en forma de **ATP** y a la pérdida de carbono (C).

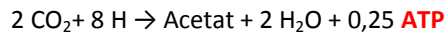
Las principales vías de fermentación de la glucosa son las siguientes:



La producción de metano es parte de la fermentación ruminal, el metano se sintetiza por los microorganismos metanogénicos, *Archaea*, según la siguiente reacción con alto consumo de H:



Sin embargo, el hidrógeno también puede ser reciclado por una forma no productiva de  $\text{CH}_4$ , pero sí de acetato, acetogénesis, con la ecuación resultante:



Esta última vía es interesante porque evita la producción de metano. Tiene lugar en el intestino grueso y ciego y al tracto digestivo de los herbívoros y omnívoros.

Estas vías de fermentación se producen simultáneamente, y en proporciones variables, dependiendo de varios factores que están estrechamente vinculados a las prácticas de alimentación. Estas variaciones influyen en la producción de metano.

Murphy *et al.* (1982) propusieron prever la estequiometría de **AGV** a partir de los sustratos fermentados (celulosa, hemicelulosa, almidón, etc.) Y las características generales de la dieta (rica o pobre en forraje). Aun así, estos sustratos no son fáciles de medir.

Otro método es calcular, por una parte, la producción total de AGV a partir de la materia orgánica fermentada (MOF), y por otro determinar la influencia de la relación NDF digestible/MOD. *In vivo* hay variaciones importantes en el perfil de AGV, las raciones ricas en forrajes producen el 66% de acético, el 19% de propiónico el 11% de butírico y el 4% de AGV menores, la relación  $\text{C}_2/\text{C}_3$  es de 3,5 y el pH ruminal de 6,2. En raciones ricas en energía fermentescible la  $\text{C}_2/\text{C}_3$  es 1,15.

Hay una buena relación entre  $\text{C}_2/\text{C}_3$  i la energía del metano expresada en % de la EB ( $\text{C}_2/\text{C}_3 = 1 \dots$  energía  $\text{CH}_4 = 2$ ;  $\text{C}_2/\text{C}_3 = 3 \dots$  energía  $\text{CH}_4 = 6,5$ ;  $\text{C}_2/\text{C}_3 = 4,5 \dots$  energía  $\text{CH}_4 = 6,5$ ).

La población microbiana se adapta a las raciones. El perfil AG de la leche está, también, ligado a la producción de metano.

---

## CO<sub>2</sub>

El 26% del C fermentado se pierde, hay 0,92 moles CO<sub>2</sub> que se pierden por mol de AGV formado, y cuanto más alta es la  $\text{C}_2/\text{C}_3$  más C en forma de CO<sub>2</sub> se pierde. Los AGV son neutralizados por bicarbonato (secreción salivar) de manera que esta neutralización da lugar a CO<sub>2</sub> (por cada molécula de AGV neutralizada hay una de CO<sub>2</sub> formada).

De 100 C de los sustratos en el rumen: 56 son los AGV, 19 del gas CO<sub>2</sub> y 25 de los microorganismos. La degradación de los glúcidos da ATP que emplean los microorganismos. El rendimiento es de 0,3 a 0,5 g MS microbiana por g de glucosa fermentada (si lo comparamos con la degradación de MN: 145 g MN microbiana formada por Kg MOF, la cual es equivalente a 0,3 g MS microbiana por g MO fermentada de glucosa).

---

## H

El H molecular se forma en las reacciones de fermentación. El H está asociado a moléculas específicas de transporte:  $\text{NADH}_2 \leftrightarrow \text{NAD} + \text{H}_2$

El H se emplea en diferentes vías metabólicas.  $\text{C}_2/\text{C}_3$  es un indicador del metabolismo H en el rumen. La salida principal y lógica del H molecular es gas H<sub>2</sub>. A pesar de ello, las condiciones termodinámicas del medio ruminal no son favorables. En la práctica el tenor en H<sub>2</sub> disuelto es débil (0,1 a menos de 50µM).

## INFLUENCIA DE LOS FACTORES ALIMENTICIOS SOBRE LAS FERMENTACIONES Y LA PRODUCCIÓN DE METANO

El metano producido se puede expresar de muchas maneras, y eso implica la necesidad de ser riguroso según el objetivo que se persiga. Parece que la mejor expresión es hacerlo por unidad entrante: energía del metano en% EB ( $6,68 \pm 1,83$ ), por Kg MS ingerida o sea g metano/Kg MS ( $22,5 \pm 6,8$ ), por Kg MOD ingerida o sea g metano/Kg MOD ( $34,1 \pm 9,2$ ). Estas tres formas de expresión están relacionadas entre sí.

### PAPEL DE LA MOD

Está ligado a MOF, que está muy medida, está ligado a UFL y UFV. De manera que tenemos las siguientes ecuaciones sobre la producción de metano:

$$\text{CH}_4/\text{MSI (g/Kg MS)} = 7,14 + 0,22 * \text{MOD (\%)}$$

$$\text{CH}_4/\text{Pv (g/Kg Pv)} = 0,083 + 0,025 * \text{MOD (g/Kg Pv)}$$

(Pv peso vivo)

A partir de estas ecuaciones se puede determinar la producción de metano en relación a la MOD:

$$\text{CH}_4/\text{MOD} = 0,22 + (7,14/\text{MOD \% MS})$$

### NIVEL ALIMENTICIO

$\uparrow \text{NA} \rightarrow \downarrow \text{CH}_4$  ya que  $\uparrow$  tránsito y  $\downarrow$  digestión microbiana, con lo cual también baja la digestibilidad de la ración.

$$\text{MOD (g/Kg MS)} = 700 - 22,7 * \text{MSI\%Pv}$$

*Perfil fermentativo, disponibilidad H, producción metano*

$$\text{C}_2/\text{C}_3 = 4,17 - 0,47 * \text{MSI\%Pv}$$

$$\text{Si NA} > 2,5 \rightarrow \text{C}_2/\text{C}_3 < 3$$

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 42,6 - 4,56 * \text{MSI\%Pv} \text{ (a más MSI\%Pv menos CH}_4\text{/Kg MOD)}$$

Si la producción de metano la referenciamos a MSI:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MSI)} = 29,5 - 3,88 * \text{MSI\%Pv}$$

### CALIDAD DE LOS FORRAJES

La calidad del forraje y la digestibilidad: La MOD es función del estado fenológico y del contenido de las paredes celulares:

$\text{MOD (g/Kg MS)} = 1.052 - 0,83 * \text{NDF (g/Kg MS)} + \text{constante}$  (24,5 para prados permanentes, 45,5 para gramíneas i 0 para leguminosas).

La calidad del forraje y la producción de metano y el perfil fermentativo: Para estimar la producción de metano se emplea esta expresión (forraje como único alimento),

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MS)} = - 22,4 - 2,25 * \text{MSI}\% \text{Pv} + 0,137 * \text{MOD (g/Kg MS)} - 0,00009 * \text{MOD}^2 \text{ (g/Kg MS)}$$

Forrajes pobres (MOD entre 400 y 450): la producción de metano es de 60 g/Kg MOD

Forrajes ricos (MOD 760): la producción de metano es de 36 g/Kg MOD

Ahora bien, los forrajes pobres producen menos metano por Kg MS.

## INFLUENCIA DE LA APORTACIÓN DE CONCENTRADO

La aportación de concentrado en la ración mejora la digestibilidad de la MO, pero depende de la calidad del forraje en la ración, del nivel de concentrado, de las interacciones digestivas y del nivel alimentario.

El perfil fermentativo y la producción de metano: la relación  $C_2/C_3 = 3,48 + 0,646 \text{ PCO} - 2,76 \text{ PCO}^2$

(PCO es la proporción de concentrado en la ración en tanto por uno). El máximo de la relación se da para  $\text{PCO} = 0,12$  (12%), y a partir de  $\text{PCO} > 0,4$  la relación va bajando.

La producción de metano atiende a la siguiente expresión:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 35,3 + 15,84 * \text{PCO} - 34,59 * \text{PCO}^2$$

Para  $\text{PCO} = 0,23$  se produce la máxima cantidad de metano, y si la proporción sube la producción de metano baja.

Sin embargo, hay influencias combinadas entre las aportaciones de concentrado y el nivel alimentario.

La relación  $C_2/C_3$  responde a la siguiente expresión:

$$C_2/C_3 = 4,28 - 0,33 * \text{MSI}\% \text{Pv} + 1,88 * \text{PCO} - 3,03 * \text{PCO}^2 - 0,27 * \text{MSI}\% \text{Pv} * \text{PCO}$$

A mayor nivel alimentario ( $\uparrow$  MSI) el efecto del concentrado (la proporción) es más alto.

La producción de metano, debido a esta influencia combinada, se expresa así:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 45,42 - 6,66 * \text{MSI}\% \text{Pv} + 0,75 * \text{MSI}\% \text{Pv}^2 + 19,65 * \text{PCO} - 35 * \text{PCO}^2 - 2,69 * \text{MSI}\% \text{Pv} * \text{PCO}$$

Para NA débiles ( $\text{MSI} = 1\% \text{ Pv}$ ) la influencia de la proporción de concentrado en la producción de metano es poco marcada.

Para NA altos la influencia negativa es muy marcada. La producción de metano depende de las interacciones digestivas y no se puede considerar como un atributo de los alimentos, en particular de los concentrados.

La naturaleza del concentrado es importante, si bien hay pocos datos específicos. En principio, si el almidón es muy degradable, la digestión es más rápida, baja el pH, y la relación  $C_2/C_3$  baja, y también la producción de metano en relación a la producción de AGV. Sin embargo, teniendo en cuenta el nivel intenso de fermentación en este caso, una ración rica en almidón muy degradable puede producir más metano que una con almidón menos degradable.

La aportación nitrogenada de la ración no parece tener una relevancia importante en la producción de metano. Sin embargo, la siguiente expresión da una relación estrecha si la producción de metano es sobre MOD:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 40,1 - 0,32 * \text{MNT} \% \text{MS}$$

En cuanto a la aportación de lípidos parece que la producción de metano baja, ya que hay menos concentración energética por Kg MS. Pero, ¿cómo lo expresamos? ¿Por animal?, ¿por MSI?, ¿en relación a la energía digestible?. Por MSI hay más pruebas hechas.

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MS)} = 29,6 - 0,0133 * \text{MSI}^2 \text{ (Kg MS)} - 0,00425 * \text{EE (g/Kg MS)}$$

Sin embargo, hay resultados contradictorios. Lo que sí es seguro es que la incorporación de lípidos en la ración modifica la fermentación ruminal y, en particular, la digestión de la fracción de glúcidos. Baja la relación C<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>.

En resumen, la producción de metano en el rumen está ligada a la fermentación, y los microorganismos adaptan su actividad en función del equilibrio entre disponibilidad en sustratos fermentescibles y sus necesidades energéticas. De tal manera que la producción de metano, asociada estrechamente a las cadenas de AGV pares, constituye un medio para sacar el mejor provecho energético de los sustratos disponibles.

Las ecuaciones propuestas son las que hemos escrito en rojo, que a continuación repetimos:

$$\text{CH}_4 / \text{MSI (g/Kg MS)} = 7,14 + 0,22 * \text{MOD (\%)}$$

$$\text{CH}_4 / \text{Pv (g/Kg Pv)} = 0,083 + 0,025 * \text{MOD (g/Kg Pv)}$$

(Pv peso vivo)

Junto con estas hay que trabajar sobre el criterio de la producción de metano expresado sobre MOD, separando los efectos de los factores de las distintas prácticas alimentarias.

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 42,6 - 4,56 * \text{MSI} \% \text{Pv}$$

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 35,3 + 15,84 * \text{PCO} - 34,59 * \text{PCO}^2$$

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 40,1 - 0,32 * \text{MNT} \% \text{MS}$$

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MS)} = 29,6 - 0,0133 * \text{MSI}^2 \text{ (Kg MS)} - 0,00425 * \text{EE (g/Kg MS)}$$

Y en cuanto a las raciones exclusivamente forrajeras:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MS)} = - 22,4 - 2,25 * \text{MSI} \% \text{Pv} + 0,137 * \text{MOD (g/Kg MS)} - 0,00009 * \text{MOD}^2 \text{ (g/Kg MS)}$$

Y por último, una vez modelizados todos los efectos hay que reagruparlos y se propone la expresión:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/Kg MOD)} = 45,42 - 6,66 * \text{MSI} \% \text{Pv} + 0,75 * \text{MSI} \% \text{Pv}^2 + 19,65 * \text{PCO} - 35 * \text{PCO}^2 - 2,69 * \text{MSI} \% \text{Pv} * \text{PCO}$$