

CONTRIBUCIÓN DE LOS RUMIANTES A LAS EMISIONES DE GASES CON EFECTO INVERNADERO

C. de Blas¹, P. García-Rebollar¹, M. Cambra-López² y A.G. Torres²

¹Departamento de Producción Animal. Universidad Politécnica de Madrid.
ETS Ingenieros Agrónomos, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

²Instituto de Ciencia y Tecnología Animal. Universidad Politécnica de Valencia
ETS Ingenieros Agrónomos, Camino de Vera s/n, 46020, Valencia

1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un considerable debate y una creciente preocupación en torno al incremento de las emisiones de gases con efecto invernadero, como resultado de la actividad humana en general, y de la ganadería en particular. Entre los sistemas de producción ganadera más implicados en estas emisiones se encuentran los rumiantes tanto para la producción de leche como para la producción de carne.

La producción ganadera procedente de especies de rumiantes tiene en España un valor económico superior a los 10.000 millones de euros por año. Dentro de ella destaca por su relevancia la producción de leche y de carne de ganado vacuno (6 millones y 650.000 Tm/año, respectivamente; MAPA, 2007).

En el caso de la producción de leche coexisten en la actualidad sistemas de diferente productividad todos ellos basados en la utilización de raciones mixtas, pero con un rango de producción por vaca que varía generalmente entre 5.000 y 10.000 kg/año, en función de diferencias en genética, concentración nutritiva de la ración y nivel de manejo de las explotaciones. En cuanto a la producción nacional de terneros, alrededor del 80% corresponde a los denominados “carne rosada” (terneras) y “añojos” (machos). Estos sistemas son característicos del área mediterránea y se basan en el empleo de piensos ricos en cereales para adaptarse a las posibilidades productivas de estos países, cuya climatología reduce la

disponibilidad y eleva los costes de producción de los forrajes. El uso de piensos con alta concentración energética conduce a una reducción paralela de la edad de su sacrificio hasta los 9-11 y 12-14 meses (para terneras y añejos, respectivamente), ya que de otra forma se produciría un excesivo engrasamiento de la canal.

En este contexto, los objetivos del presente trabajo son i) establecer la contribución del sector de producción de rumiantes a las emisiones de gases con efecto invernadero, ii) revisar sus principales factores de variación en función de variables relacionadas con el tipo de animal y la alimentación recibida, y iii) definir esas emisiones en función de los sistemas de producción predominantemente utilizados.

2.- EFECTO INVERNADERO. EL BALANCE DEL CARBONO

La presencia en la atmósfera de algunos gases, como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los clorofluorcarbonados (CFC) implica un incremento de la temperatura del aire. Esto es debido a que estos gases permiten el paso de la radiación solar, pero absorben una parte de la irradiación infrarroja reemitida desde la Tierra. Aunque sólo constituyen una pequeña proporción ($< 1\%$) de los gases de la atmósfera, la existencia de gases invernadero de origen natural ha favorecido el desarrollo de vida en la Tierra, ya que se estima que en su ausencia la temperatura media descendería desde los $+15^\circ\text{C}$ actuales hasta los -18°C , donde la vida no sería posible. Sin embargo, el aumento de emisiones ligado a la actividad humana (agricultura, industria, transporte, etc...) ha supuesto un incremento sustancial de las emisiones totales, especialmente en los últimos años, y la consiguiente alarma sobre las consecuencias de un recalentamiento global. Así, la concentración de CH_4 atrapada en los hielos polares permaneció estable hasta hace unos 100 años (≈ 750 ppb), momento en el que empezó a aumentar hasta alcanzar los niveles actuales de 1.800 ppb (Khalil et al., 1993; Johnson y Johnson, 1995).

El poder de captación de la radiación varía de unos gases a otros (ver cuadro 1), de forma que aunque el CH_4 , N_2O y CFC se encuentran en la atmósfera a concentraciones muy inferiores al CO_2 (200 veces menor en el caso del CH_4), su contribución al efecto invernadero alcanza niveles muy significativos: 18, 6 y 14%, respectivamente, frente al 49% del CO_2 (Rhode, 1990).

Existen también diferencias notables entre estos gases en cuanto a su vida media en la atmósfera (Van Soest, 1994; Chatelier y Verité, 2003), que es notablemente más corta para el metano (10-20 años) que para el CO_2 (50-200 años) y el óxido nitroso (100-150 años). Como consecuencia, el acuerdo de Kyoto ha enfatizado el interés en priorizar la actuación sobre las emisiones de metano, por tener una repercusión más rápida en la reducción del efecto invernadero.

Cuadro 1.- Poder de recalentamiento global (PRG) de diferentes gases con efecto invernadero en base a equivalentes-CO₂ (Hacala, 2006).

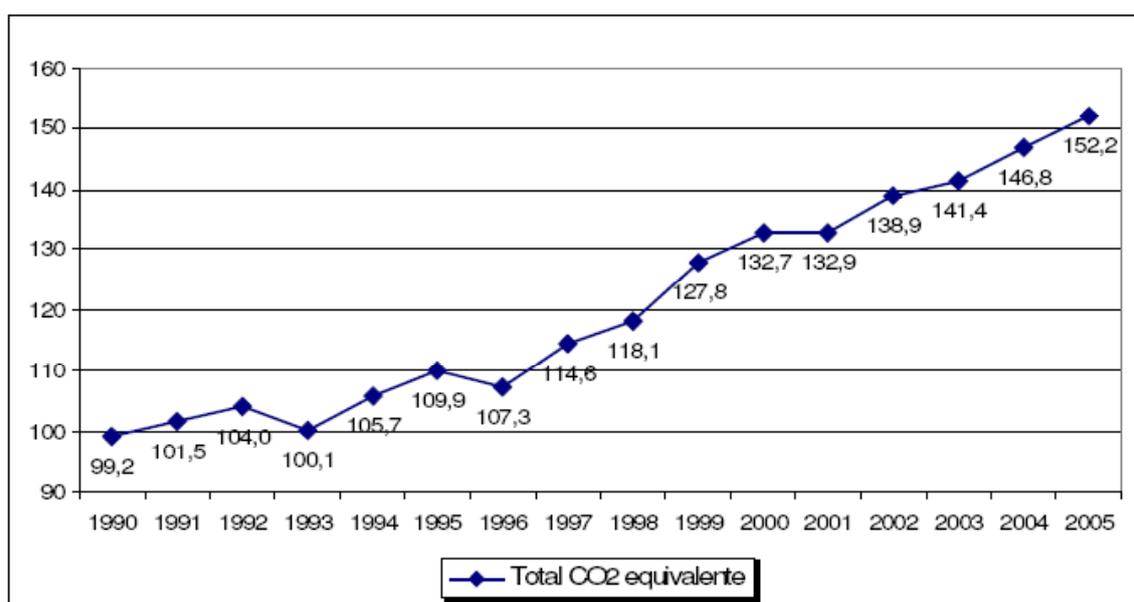
Gas	PRG
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido nitroso (N ₂ O)	310
Clorofluorcarbonados (CFC)	140-11.700

Es importante tener en cuenta que en el protocolo de Kyoto, los inventarios de emisiones de dióxido de carbono sólo contabilizan el CO₂ que procede de combustibles de origen fósil (petróleo, carbón, gas natural). En cambio, no se considera el CO₂ que se emite a partir de fuentes de C renovables (como el que se produce en la combustión aerobia de alimentos en los animales), puesto que ese carbono fue fijado previamente por fotosíntesis a partir de CO₂ atmosférico. También se contabiliza la conversión de CO₂ en CH₄ en procesos fermentativos microbianos, como los que ocurren en el aparato digestivo de los animales, en el suelo o en zonas pantanosas, puesto que, a igualdad de contenido en carbono, cada molécula de CH₄ tiene un valor PRG 21 veces superior al CO₂ (ver cuadro 1), o la emisión de N₂O desde el suelo a partir de compuestos nitrogenados (NH₃, NO₃⁻) añadidos en forma de fertilizantes orgánicos (estiércol) o inorgánicos.

Por contra, determinados aprovechamientos agrícolas, como las praderas, permiten secuestrar carbono en la materia orgánica del suelo (del orden de 0,5 Tm de carbono/ha y año; Soussana et al., 2004) reduciendo la presencia de CO₂ en la atmósfera, con la disminución consiguiente del efecto invernadero.

El aumento de las emisiones totales de gases con efecto invernadero y su evolución para España, expresada en unidades de CO₂ equivalente, se muestra en la figura 1, donde de igual modo se deduce cómo desde 1996 la tendencia creciente ha ido incrementándose. Desde el año base de referencia (1990), las emisiones de gases con efecto invernadero han aumentado una media de un 4% anual.

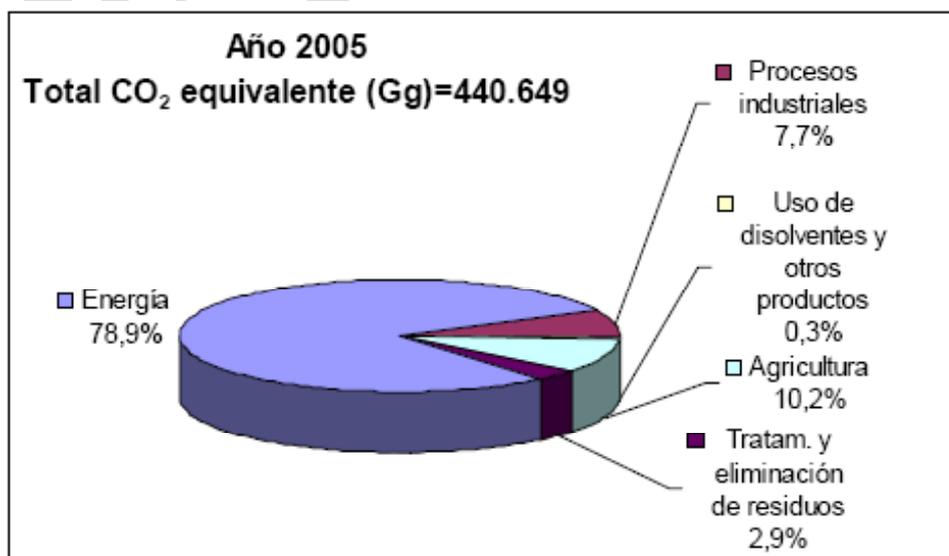
Figura 1.- Evolución de las emisiones de gases con efecto invernadero (CO₂ equivalentes) en España, expresadas en Gigagramos de CO₂ equivalentes (Ministerio de Medio Ambiente, 2007b).



3.- LA AGRICULTURA Y LA GANADERÍA COMO ORIGEN DE GASES CON EFECTO INVERNADERO

La contribución media de las diferentes fuentes al efecto invernadero se muestra en la figura 2. El sector agrario en su conjunto supone en España alrededor de un 10% del total, mientras que casi un 80% procede de los procesos de obtención de energía.

Figura 2.- Contribución proporcional de las principales fuentes del efecto invernadero en España (Ministerio de Medio Ambiente, 2007a)



El óxido nitroso (N_2O) se forma en los procesos microbianos de nitrificación: oxidación de N-amoniaco (NH_4^+) a nitratos (NO_3^-) y de desnitrificación: reducción de NO_3^- y NO_2^- hasta N molecular (N_2) y procede en su mayor parte del abonado químico de los cultivos y en una pequeña proporción de la fertilización orgánica. Las emisiones de N_2O aumentan en proporción a los aportes de N al terreno, y depende de numerosos factores, tales como la aireación del suelo (el proceso sólo se produce en condiciones aerobias), la temperatura, el pH y la humedad del suelo (Sánchez, 2008). Al efecto contaminante del N_2O como gas con efecto invernadero debe añadirse además el hecho que participa de forma activa en la destrucción de la capa de ozono.

El metano se forma en procesos de fermentación anaerobia que tienen lugar en los animales (fermentación entérica) y en el estiércol, pero también de la fermentación de material celulósico en arrozales y terrenos pantanosos, o se libera por fugas en los yacimientos de energía fósil (gas natural, gas grisú). La contribución relativa de las principales fuentes de metano se presenta en el cuadro 2. Como puede apreciarse, la ganadería es responsable en España de una parte significativa de las emisiones de CH_4 (del orden de un 60% del total, incluyendo tanto la fermentación entérica como la gestión del estiércol).

Cuadro 2.- Componentes de las emisiones de metano a la atmósfera (%; Ministerio de Medio Ambiente, 2007a).

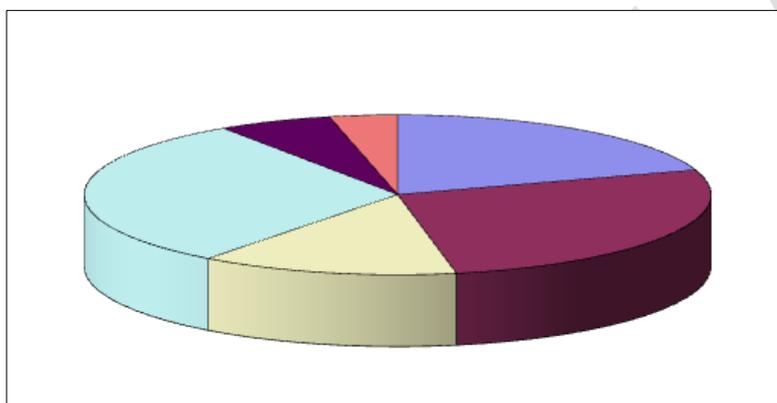
Fermentación entérica	36,2
Vertederos, tratamiento de aguas residuales y otros residuos	31,0
Gestión del estiércol	23,8
Fugas de los combustibles	5,0
Actividades de combustión energética	2,9
Arrozales	0,8

La mayor parte de las emisiones de CH_4 por fermentación entérica procede de los animales de especies herbívoras, especialmente de los rumiantes y en particular del ganado vacuno que por su censo y tamaño relativo supone del orden del 60-75% del total (Van Soest, 1994; Vermorel, 1995; Johnson y Johnson, 1995; Ministerio del Medio Ambiente, 2007a; figura 3). Una estimación del reparto de esta cantidad entre los distintos tipos de bovinos en España se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3.- Estimación de la contribución proporcional (%) de distintos tipos de bovinos a las emisiones totales de CH₄ por el ganado vacuno en España (UPV, 2006)

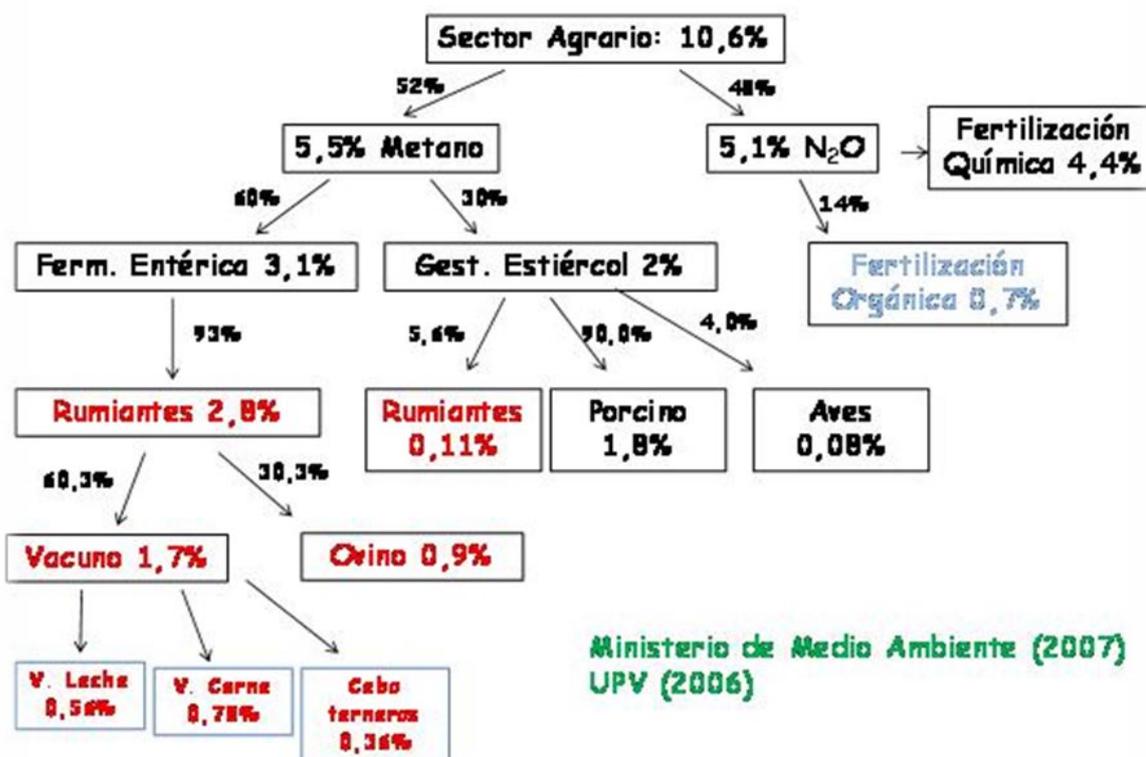
Vacas reproductoras de carne	39
Vacas de ordeño	26
Terneros de cebo	21
Animales de recría	12
Sementales	2

Figura 3.- Contribución de las diferentes producciones ganaderas a las emisiones de metano (Ministerio de Medio Ambiente, 2007a)



En la figura 4 se presenta un resumen de la importancia relativa de la contribución de la ganadería a las emisiones de gases con efecto invernadero en España. Como puede apreciarse, la proporción correspondiente a la ganadería de rumiantes (fundamentalmente a través de la fermentación entérica) y de monogástricos (vía formación de metano a partir de la gestión del estiércol y emisiones de N₂O) se estima en alrededor de un 3 y un 2% de las emisiones totales, respectivamente.

Figura 4.- Contribución de la ganadería de rumiantes al efecto invernadero en España (% de las emisiones totales en CO₂ equivalente)



4.- FISIOLÓGÍA DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN EL APARATO DIGESTIVO DE LOS RUMIANTES

De acuerdo con lo expuesto en párrafos anteriores, la producción ganadera es responsable directa o indirectamente (a través del estiércol) de una proporción relevante de las emisiones de metano y, a través de ello, de las emisiones de gases con efecto invernadero.

El metano se forma como resultado de la fermentación de una parte del alimento por parte de la flora microbiana residente en el aparato digestivo de los animales. De esa fermentación los microorganismos obtienen la energía que precisan para sus funciones vitales, y el huésped la posibilidad de acceder a una parte de los nutrientes del alimento, que de otra forma resultarían indigestibles. El sustrato para estos procesos fermentativos son cadenas carbonadas procedentes principalmente de la hidrólisis de los hidratos de carbono del alimento. Los microorganismos disponen de enzimas capaces de actuar no sólo sobre los carbohidratos de reserva (almidón), sino también sobre los hidratos de carbono estructurales que forman parte de la pared celular de las plantas (fracción fibrosa). El resultado de la hidrólisis de estos polisacáridos son sus azúcares constituyentes, de

forma que tanto el almidón como la celulosa dan lugar a la liberación de glucosa como resultado final de este proceso. Análogamente, la hidrólisis de hemicelulosas, pectinas y fructanos dan lugar respectivamente a la formación de pentosas, ácidos urónicos o fructosa. No todos los componentes hidrocarbonados del alimento son igualmente hidrolizables. Los principales factores que condicionan la eficacia del proceso son el grado de lignificación de la fibra, que dificulta la actuación de los microorganismos, y el tiempo de que dispongan éstos para realizar la digestión.

En una segunda etapa, la flora digestiva fermenta los azúcares liberados (ver figura 5) dando lugar como producto final a la formación de ácidos grasos volátiles (AGV), CO_2 , CH_4 y calor, así como al crecimiento y proliferación de los propios microorganismos. Tanto los AGV como los microorganismos son nutrientes o fuentes de nutrientes fácilmente disponibles para el animal huésped. El metano producido (alrededor de 50 a 400 l/d en ovino y vacuno adulto, respectivamente) resulta inerte tanto para la flora como para el huésped, siendo excretado en el eructo y en el aire expirado (ver figura 6).

Figura 5.- Fermentación de los constituyentes del alimento en los compartimentos digestivos de los rumiantes, dando lugar a la formación de metano (según Czerkawski, 1986)

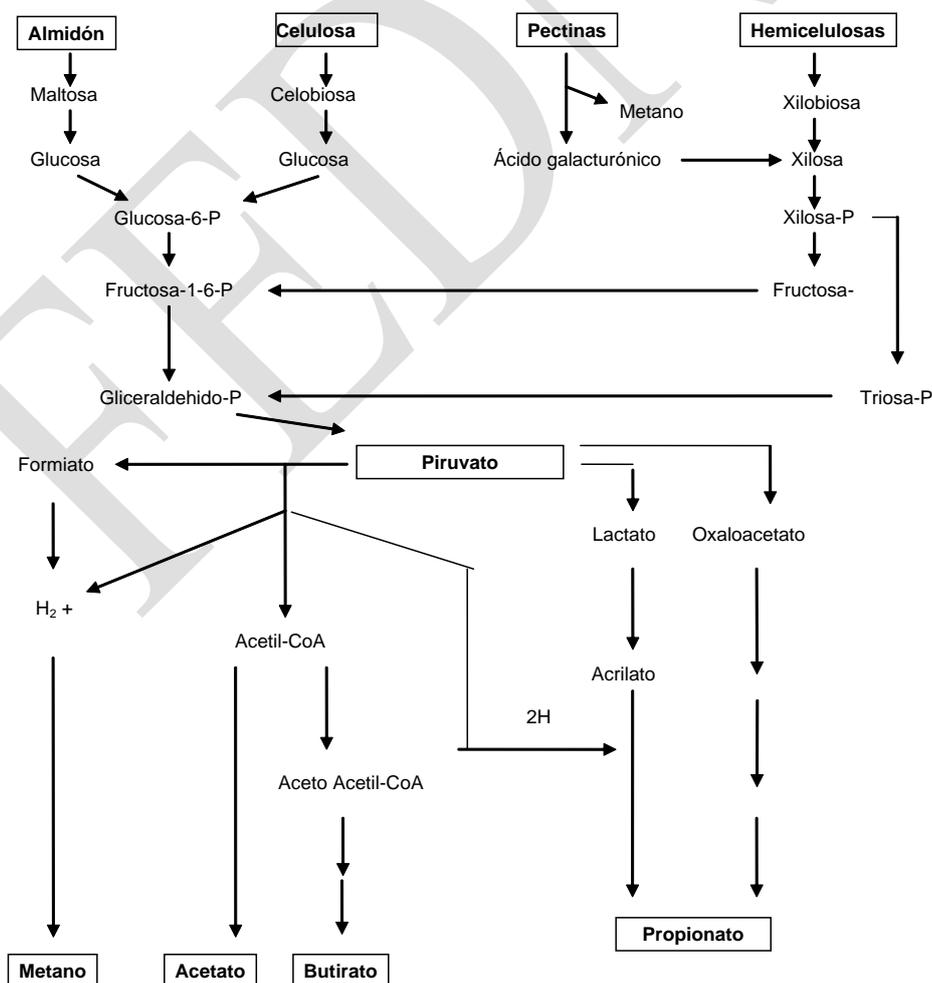
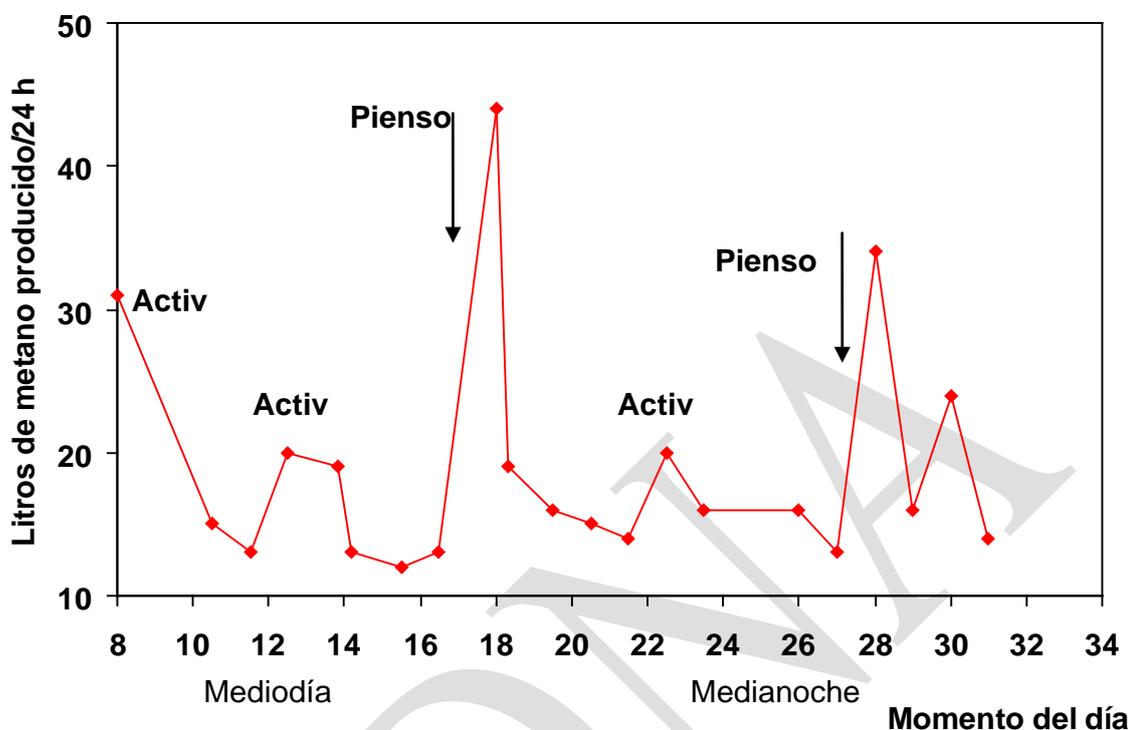
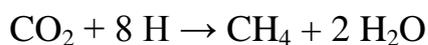


Figura 6.- Variación típica en la producción de CH₄ de una oveja durante un período de 24 horas. Nótese los picos de producción asociados con la comida y con la actividad física del animal (según Blaxter, 1964)



La flora microbiana responsable de los procesos fermentativos alcanza concentraciones muy elevadas (10^{11} - 10^{12} /g contenido digestivo), tanto en el rumen como en el intestino grueso. La flora es por otra parte extremadamente compleja, estando constituida por un gran número de especies y géneros protozoos y bacterias que interactúan entre sí y cuyo crecimiento se estimula o se inhibe en función del sustrato fermentado y de las condiciones del medio (principalmente acidez y velocidad de renovación).

Dentro de esta complejidad, se establecen grandes grupos de microorganismos en función del tipo de sustrato que fermentan (por ej. “amilolíticos” o “celulolíticos”). Un grupo de microorganismos anaerobios estrictos denominado “metanogénicos” constituido por diferentes especies pertenecientes al subgrupo Archae (Van Soest, 1994) es capaz de obtener energía reduciendo H₂ del gas del rumen y generando CH₄ como producto final:



5.- FACTORES QUE DETERMINAN LA PRODUCCIÓN DE METANO EN EL APARATO DIGESTIVO

5.1.- Factores ligados al animal

5.1.1.- Especie animal

La formación de CH₄ depende del tamaño y situación de la zona fermentativa, así como de la existencia de mecanismos que favorezcan la retención del alimento y que prolonguen, por tanto, el tiempo de actuación de los microorganismos. El gran volumen relativo del rumen, unido a su localización al principio del aparato digestivo y a la presencia del omaso, que dificulta la salida de partículas gruesas de alimento, favorece la existencia de una densa población microbiana (del orden de 2 kg de bacterias en un vacuno adulto; INRA, 1978). Se estima que como media un 80% de la materia orgánica del alimento (incluyendo no sólo la fracción fibrosa sino también gran parte de los componentes del contenido celular) es fermentada en el rumen (INRA, 1988; NRC, 2001).

En el ciego y colon de los rumiantes y también en otras especies animales, especialmente las herbívoras (caballos, conejos) y en menor grado las omnívoras (porcino), ocurre también fermentación de nutrientes. Sin embargo, en estas zonas los microorganismos sólo pueden actuar sobre la fracción del alimento no digerida en el intestino delgado (constituyentes fibrosos principalmente). Además el tiempo de retención del residuo alimenticio es mucho más limitado que en el rumen, por lo que su importancia cuantitativa es inferior que la que ocurre en el rumen.

5.1.2.- Peso/edad

El rumen y los procesos fermentativos se desarrollan con la edad, de forma que son mínimos en rumiantes lactantes, en los que la leche pasa directamente al abomaso sin fermentar, y pasan a alcanzar después del destete una tasa proporcional a su tamaño (a la misma escala que en animales adultos).

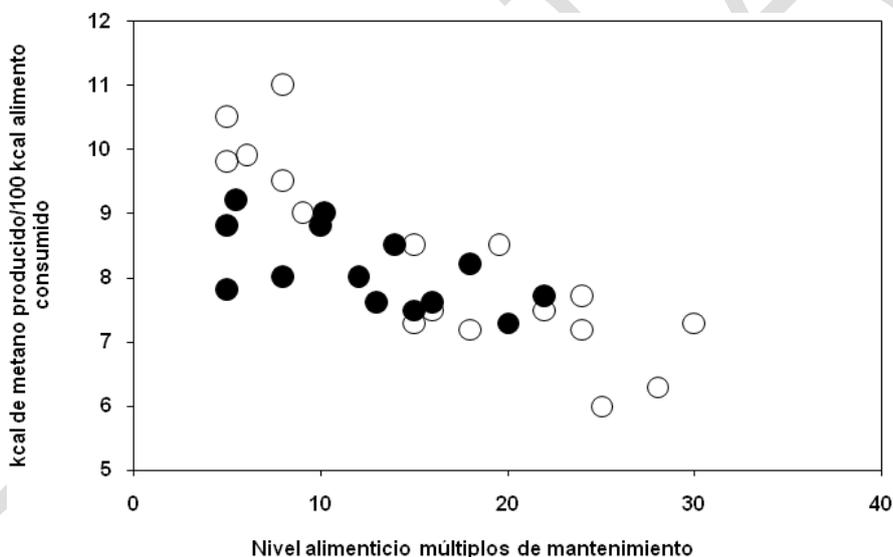
Un análisis realizado en Nueva Zelanda (Machmüller y Clark, 2006) sobre resultados de producción de metano en rumiantes (vacuno y ovino) en pastoreo, muestra que la producción diaria de metano varía linealmente con el peso del animal expresado sobre peso metabólico (PM = peso vivo^{0,75}):

$$\text{CH}_4 \text{ (g/d)} = 3,58 \text{ PM} - 35,8; \text{ R}^2 = 0,83; \text{ n} = 1025$$

5.1.3.- Nivel de producción

Un incremento del nivel de ingestión de alimento en animales altamente productivos implica un incremento de la velocidad de tránsito por el rumen y, como consecuencia, un menor tiempo de actuación de los microorganismos, una menor digestión fermentativa y una menor formación de metano en términos relativos (Blaxter, 1964; ver figura 7). Este mismo autor estima que un incremento del nivel de alimentación desde el mantenimiento a dos veces este valor, implica un descenso de la producción relativa de CH₄ de 1-1,5 kcal/100 kcal energía bruta ingerida.

Figura 7.- Producción de metano de ovinos y bovinos en relación al nivel alimenticio. Ambas especies recibieron cantidades diferentes de las mismas raciones y ambas muestran disminuciones comparables en la producción de metano con el aumento de la ingestión de alimentos (Blaxter, 1964)



Una revisión realizada por Vermorel (1995) muestra que la cantidad de CH₄ producida por litro de leche en vacas se reduce al aumentar el nivel de producción según la siguiente ecuación:

$$\text{CH}_4/\text{P. leche (l/l)} = 6,86 + 317/\text{P. leche (l/d)}$$

De la particularización de esta ecuación se deduce que la relación CH₄/P. leche disminuye desde 41,1 l/l en vacas de 3.400 l/año hasta 24,8 l/l en vacas de mayor capacidad productiva (6.500 l/año). Una relación curvilínea similar ha sido obtenida por Holter y Young (1992); Kirchgessner et al. (1994) y Machmüller y Clark (2006).

De igual forma, Vermorel (1995) observa que la producción de metano (m^3/kg canal) es inferior (del orden de la tercera parte) en animales de razas lecheras sacrificados a edades jóvenes que en los sistemas más extensivos (animales de razas de carne sacrificados a 40 meses de edad). No obstante, debe tenerse en cuenta que parte de estas diferencias se compensan por un mayor consumo de energía fósil en los sistemas de producción más intensivos.

5.2.- Factores ligados a la alimentación de rumiantes

5.2.1.- Relación de concentrado a forraje en la ración

La alimentación de rumiantes con raciones que contienen altas cantidades de concentrado en relación al forraje da lugar a una disminución del pH del contenido ruminal. Este efecto es consecuencia por un lado de la mayor velocidad de fermentación del concentrado y por otro de la disminución del poder tampón asociado al consumo de forraje de forma directa (capacidad buffer de las pectinas o la lignina) o indirecta (a través de la inducción de la rumiación y de la entrada en el rumen de tampón fosfato y bicarbonato contenido en la saliva).

La acidificación del contenido ruminal supone cambios en la composición de la flora microbiana, que incluyen una disminución de la densidad de flora celulolítica y un aumento de la flora amilolítica. Como consecuencia, se reduce la digestión de la fibra y se altera el tipo de fermentación hacia la formación de una menor cantidad de ácido acético y mayor de ácido propiónico (ver cuadro 4). El tipo de ácidos grasos producido en la fermentación tiene un efecto directo sobre la cantidad de H y CH_4 liberados, ya que, como se aprecia en la figura 8, la formación de ácido acético es paralela a la de H (4 moles de H/mol acético) mientras que la de ácido propiónico implica captura de H (2 moles de H/mol propiónico). De esta forma, las emisiones de CH_4 aumentan en paralelo a la relación [acético + butírico]/propiónico formado en el rumen (Moss et al., 2000; ver figura 9).

Cuadro 4.- Proporciones molares de AGV y pH del líquido ruminal de ovejas alimentadas con dietas basadas en urea y paja de cereales o grano de cebada (según Oldham et al., 1977)

Dieta	pH	% acético	% propiónico	% butírico
Paja de cebada	5,9	68	17	14
Grano de cebada	4,9	53	32	13

Figura 8.- Balance de la fermentación de azúcares en el rumen según el tipo de ácido graso volátil producido (Van Soest, 1994).

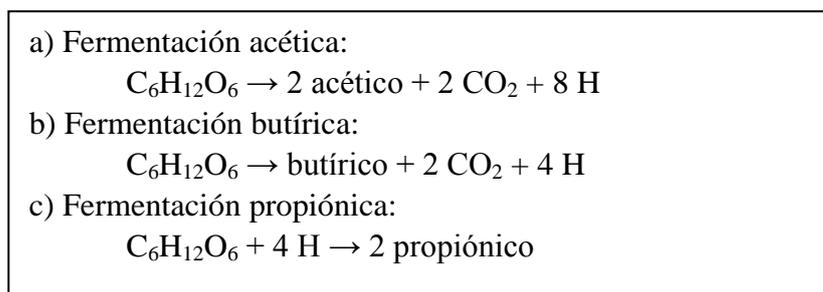
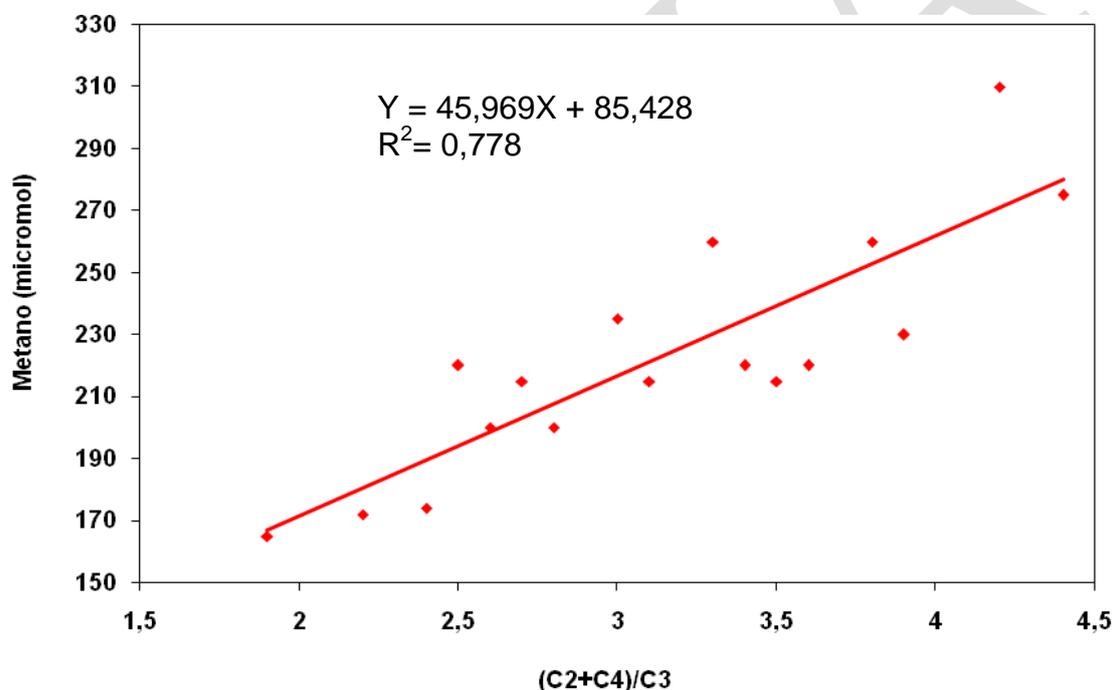


Figura 9.- Efecto del perfil de ácidos grasos volátiles producido en el rumen sobre las pérdidas de metano (según Moss et al., 2000).



El resultado final del proceso es que un aumento de la proporción de concentrado en la ración supone un descenso considerable de la concentración de H, de bacterias metanogénicas y de la producción de metano (Van Soest, 1994; Lana et al., 1998). Un ensayo realizado en Australia (Harper et al., 1999) mostró que la producción de energía en forma de metano de novillas en pastoreo alimentadas con forrajes de baja calidad alcanzaba entre un 7,7 y un 8,4% de la energía bruta ingerida, mientras que cuando los mismos animales recibían una ración rica en grano (80% de avena), las emisiones de energía en forma de metano disminuían hasta un 1,9-2,2% de la energía bruta ingerida, es decir a un nivel de alrededor de 4 veces inferior.

5.2.2.- Tipo de concentrado

Los granos de cereales con una alta proporción de endospermo harinoso (trigo, cebada, avena), así como la mandioca son más fácil y rápidamente fermentados en el rumen que los que contienen una proporción similar de endospermo harinoso y endospermo córneo (maíz, sorgo; ver cuadro 5). Como consecuencia, el tipo de concentrado incluido en la ración implica cambios en la acidez ruminal y en el tipo de fermentación (acética/propiónica) resultante, y, previsiblemente, en la cantidad de CH₄ producido. En concordancia con ello, un trabajo reciente (Beauchemin y McGinn, 2005) muestra que la sustitución de grano de cebada por maíz grano reduce las emisiones de metano desde un 4,03 hasta un 2,81% de la energía bruta ingerida en raciones concentradas para terneros en cebo intensivo (sistema feedlot).

Cuadro 5.- Efecto del tipo de grano de cereal sobre la proporción de almidón soluble y degradable en el rumen (Sauvant et al., 2004)

Cereal	% almidón	
	Soluble	Degradable
Maíz	23	60
Trigo blando	58	94
Cebada	52	89

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el procesado térmico del maíz y el sorgo implica un incremento de su digestibilidad ruminal y, como consecuencia, un comportamiento más similar al del resto de los granos de cereales.

5.2.3.- Tipo de forraje

El uso de fuentes de fibra poco lignificadas (como la pulpa de remolacha, la cascarilla de soja o forrajes jóvenes de alta calidad) implica una mayor tasa de fermentación y de producción de metano que el de forrajes maduros o subproductos altamente lignificados. Así, los resultados del cuadro 6 muestran una relación positiva entre la digestibilidad aparente del forraje y la cantidad relativa de CH₄ producida. De hecho el uso de fuentes de fibra lignificadas se ha sugerido como forma de reducir las emisiones de metano (Kreuzer y Hindrichsen, 2006).

De los resultados del cuadro 6 puede también deducirse que la molienda y posterior granulación de los forrajes supone un descenso de las emisiones de metano, especialmente cuando los forrajes son de buena calidad. El procesado de los forrajes supone una disminución del tamaño de sus partículas y, por ello, una mayor facilidad de salida, un menor tiempo de permanencia en el rumen y una menor tasa de fermentación,

especialmente notable en los forrajes de mayor calidad, potencialmente más fermentables. Por otra parte, la molienda del forraje da lugar a un menor tiempo de rumiación, una acidificación del contenido ruminal y una reducción de la relación acético/propiónico, lo que resulta en un efecto adicional sobre la disminución de la producción de metano.

Cuadro 6.- Producción de metano al nivel alimenticio de mantenimiento (kcal de CH₄/100 kcal de alimento suministrado) en relación con la digestibilidad aparente del forraje y de su tamaño de molienda (Blaxter, 1964)

Ración	Digestibilidad aparente de la energía (%)				Desviación típica de un ensayo aislado
	50	60	70	80	
Groseros	7,2	7,8	8,4	9,0	± 4,07
Granulados	7,0	7,3	7,5	7,7	± 0,53

5.2.4.- Suplementación con grasa insaturada y de cadena media

Varios autores han señalado que la adición de grasa, especialmente grasa insaturada (Zhang et al., 2008) y de cadena media (Lovett et al., 2003; Jordan et al., 2006b; Beauchemin y McGinn, 2006b) a la ración, implica alteraciones de la composición de la flora microbiana que se traducen en una disminución de la digestión de la fibra y favorecen la formación de propiónico y una menor producción de metano (Demeyer et al., 1969; Van Soest, 1994; Johnson y Johnson, 1995).

De una revisión de Giger-Reverdin et al. (2003) sobre resultados obtenidos con 37 raciones en 7 trabajos se dedujo la siguiente ecuación de regresión:

$$\text{CH}_4 \text{ (l/kg MSi)} = 47,3 - 0,0212 \text{ MSi}^2 - 0,680 \text{ Ext. etéreo (\% MS)};$$

$$R^2 = 0,76 ; \text{ RSD} = \pm 2,62$$

La precisión de la ecuación aumentaba (hasta $R^2 = 0,84$; $\text{RSD} = \pm 2,16$), cuando se incluían adicionalmente el nivel de insaturación y la longitud de la cadena de los ácidos grasos como variables predictoras.

Las hipótesis para explicar esta relación incluyen: i) la competencia por el H generado en el rumen para la saturación de los ácidos grasos, reduciendo su disponibilidad para la formación de CH₄ por las bacterias metanogénicas, ii) un efecto tóxico directo de los ácidos grasos o de sus derivados metabólicos en el rumen sobre la flora metanogénica y celulolítica, y iii) la disminución de la digestibilidad ruminal del sustrato potencialmente fermentable (especialmente fibra) que reduciría la producción de acético, butírico e H.

Debe también tenerse en cuenta que los efectos de reducción de la producción de metano por una menor digestión de la fibra (a través de la suplementación con grasa o la disminución del tamaño de partículas) se compensan en mayor o menor grado por una mayor excreción en heces de fibra fermentable y, por tanto, con unas mayores emisiones por la fermentación anaerobia del estiércol.

5.2.5.- Suplementación con aditivos

Según numerosos autores (Van Soest, 1994; Johnson et al., 1994; Johnson y Johnson, 1995; Sauer et al., 1998; McGinn et al., 2004; Beauchemin y McGinn, 2006a), el uso de antibióticos ionóforos, como la monensina, la rumensina o el lasolacid, reducen el consumo de alimento, la concentración de flora Gram positiva, la relación acético:propiónico, la formación de H y la de metano (hasta un 25%). Sin embargo, el uso de este tipo de aditivos no se encuentra actualmente autorizado en los países de la UE. Por ello, en los últimos años se ha investigado el uso de diversos aditivos naturales por su efecto antimetanogénico.

Así, se ha determinado que algunos ácidos orgánicos, como el ácido málico y el ácido fumárico compiten por el H del gas del rumen con diversas bacterias metanogénicas (*Fibrobacter succinogenes*, *Selenomonas ruminantium*, *Veillonella parvula* y *Wollinella succinogenes*), resultando en reducciones de las emisiones de CH₄ comprendidas entre un 3 y un 17%, que no siempre alcanzaban significación estadística (Carro et al., 1999; Asamuna et al., 1999; Carro et al., 2003; Caja et al., 2003; McGinn et al., 2004; Beauchemin y McGinn, 2006a). Igualmente varios estudios han mostrado que el uso de taninos condensados procedentes de diferentes especies (*Lespedeza*, *Acacia*, *Calliandra*, *Sorgo*) es efectivo a dosis bajas o moderadas en la reducción de emisiones de metano en ganado ovino (Hess et al., 2003; Carulla et al., 2005; Puchala et al., 2005; Animut et al., 2008 a,b). Otros autores (Calsamiglia et al., 2005) han detectado un efecto inhibitor en condiciones in vitro de la producción de metano de diversos extractos de plantas, tales como *Equisetum arvense*, *Salvia officinalis*, *Armoracia rusticana*, *Allium sativa* y *Origanum vulgare*. No obstante, el valor de estos productos a nivel práctico no está todavía plenamente establecido.

6.- MODELOS DE PREDICCIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO EN RUMIANTES

El primer modelo para la estimación de la producción de CH₄ (Y_m, kcal CH₄/100 kcal EBi) en rumiantes fue establecido por Blaxter y Clapperton (1965), a partir de datos obtenidos en ganado ovino adulto consumiendo forrajes y utilizando como predictores la

digestibilidad de la energía de la ración (dE, %) y el nivel de alimentación (L, en múltiplos del nivel de mantenimiento, L = 1):

$$Y_m = 1,30 + 0,112 \text{ dE} + L (2,37 - 0,05 \text{ dE})$$

La particularización de la ecuación muestra un efecto positivo de la dE del forraje y negativo del L sobre Y_m . No obstante, la extrapolación de estos resultados a dietas prácticas debe hacerse con precaución al no haberse incluido información procedente de raciones mixtas con concentrado en animales de alta producción. Así, el rango de valores de Y_m predicho por la ecuación en un intervalo de dE y L correspondiente a dietas prácticas se encuentra entre un 6 y un 8%, cuando los valores obtenidos in vivo tienen una variación considerablemente superior (2-11%, Johnson y Johnson, 1995; Harper et al., 1999).

Una aproximación alternativa para estimar las emisiones de metano (CH_4 , Mcal/d) en rumiantes fue propuesta por Moe y Tyrrell (1979) a partir de 404 balances de energía en vacuno adulto y utilizando como predictores las ingestiones de nutrientes brutos o digestibles (kg/d). Las ecuaciones fueron calculadas mediante una selección de variables (método stepwise), y fueron las siguientes:

a) nutrientes brutos

$$\text{CH}_4 = 0,814 + 0,122 \times \text{CNF (carbohidratos no fibrosos, fundamentalmente almidón)} + 0,415 \text{ HEL (hemicelulosa)} + 0,633 \text{ CEL (celulosa); } R^2 = 0,67$$

b) nutrientes digestibles

$$\text{CH}_4 = 0,439 + 0,273 \times \text{CNF} + 0,512 \text{ HEL} + 1,393 \text{ CEL; } R^2 = 0,73$$

Los resultados reflejan que los precursores para la producción de metano son principalmente los hidratos de carbono y que existen diferencias notables debidas al tipo de carbohidrato: 6,5; 11,5 y 33,6 kcal $\text{CH}_4/100$ kcal de CNF, HEL y CEL digestibles, respectivamente. También muestran que la precisión de la ecuación aumenta cuando se tienen en cuenta las diferencias en digestibilidad entre alimentos. Sin embargo, esta información no siempre está disponible ni es fácil de estimar.

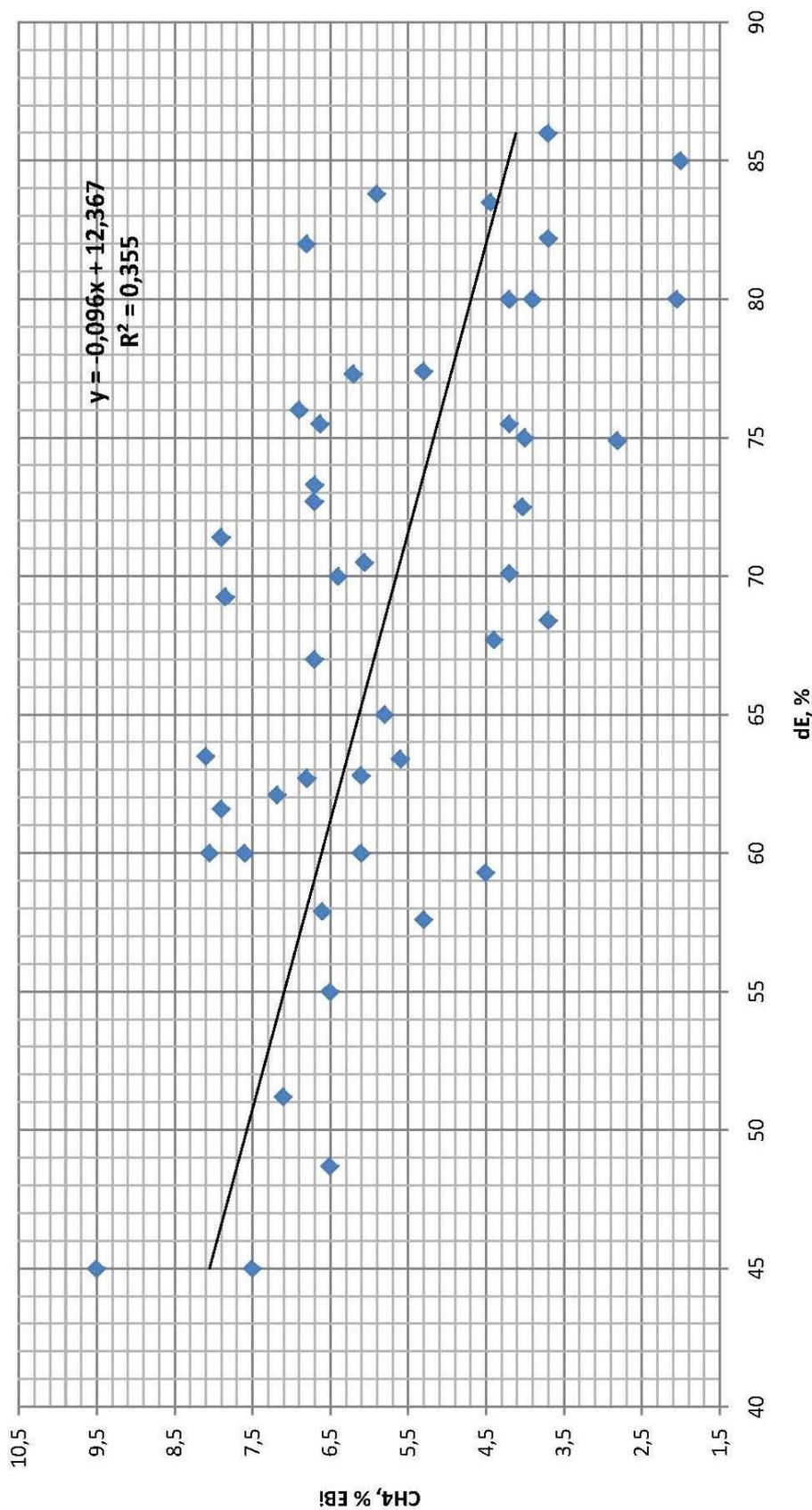
El rango de valores de Y_m predichos por las ecuaciones de Moe y Tyrrell se aproxima más a los valores determinados in vivo de Y_m que la de Blaxter y Clapperton. Comparaciones realizadas por Wilkerson et al. (1995) y Ellis et al. (2007) entre varios modelos de predicción muestran que la ecuación de Moe y Tyrrell es la que presenta menor error de predicción entre las diversas propuestas, aunque la precisión puede mejorarse ligeramente mediante modelos más complejos que incluyen como predictoras variables ligadas a parámetros productivos (producción de leche, contenido de la leche en grasa y proteína; Holter y Young, 1992). No obstante, su particularización para raciones altamente concentradas suplementadas con paja, como las que se usan en España en el cebo intensivo de terneros, conduce a estimaciones de Y_m en el entorno de un 7%, que es un valor superior al observado en ensayos in vivo (3-5%).

En la figura 10 se presenta una revisión de valores obtenidos en ensayos recientes (Holter y Young, 1992; Johnson et al., 1994; Vermorel et al., 1995; Kirkpatrick et al., 1997; Harper et al., 1999; Yan et al., 2000; Estermann et al., 2002; Lovett et al., 2003; Beauchemin & McGinn, 2004; McGinn et al., 2004; Lovett et al., 2005; Beauchemin y McGinn, 2006b; Nkrumah et al., 2006; IPCC, 2006; Jordan et al., 2006a; Jordan et al., 2006b; Lassey, 2007) sobre la correlación existente entre la digestibilidad de la energía de la ración y las pérdidas de energía en forma de metano, expresadas como proporción de la energía bruta ingerida.

Los resultados muestran que en los sistemas actuales de producción sigue existiendo una correlación negativa entre la concentración energética de la ración y las emisiones de metano en rumiantes, de forma que los valores medios se reducen desde alrededor de un 6,5-7,5% en raciones extensivas hasta un 4,0-4,5% en raciones concentradas.

También se aprecia que las variables independientes (digestibilidad y consumo de alimento) sólo explican un 36% de la variación de la producción de energía en forma de metano. En este mismo sentido, en la figura puede observarse la existencia de una elevada dispersión de los datos de emisión de CH_4 para cada valor de digestibilidad, lo que demuestra que otros factores implicados en la formación del metano descritos en apartados anteriores tienen una elevada influencia.

Figura 10.- Efecto de la digestibilidad de la energía de la ración (dE, %) sobre las emisiones de metano (CH₄, %EBI) según revisión de trabajos recientes.



7.- SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN PARA GANADO VACUNO EN ESPAÑA: APROXIMACIÓN A DIETAS PRÁCTICAS

7.1.- Cebo de terneros

En la actualidad existen en España básicamente dos tipos de producción de terneros de cebo. Los denominados terneros ‘mamones’ proceden de razas lecheras (fundamentalmente frisonas) y entran en cebo con 60-80 kg de peso y 4 semanas de edad, después de seguir programas de lactancia artificial. Durante su primera etapa en el cebadero, estos terneros reciben un pienso de ‘**iniciación**’ relativamente rico en proteína (18-20%) y no excesivamente concentrado en energía (alrededor de 1 UFc/kg) hasta que alcanzan los 150-200 kg de peso (ver cuadro 7).

Los denominados terneros ‘pasteros’ proceden de rebaños extensivos de vacas autóctonas de carne y entran a cebo después de una lactancia natural, a los 5-7 meses de edad con unos 180-200 kg de peso. Los terneros pasteros reciben al llegar al cebadero un pienso de ‘**adaptación**’ durante 2-3 semanas para limitar el efecto del estrés de entrada, reducir los problemas de paraqueratosis y suavizar el cambio al tipo de alimentación que van a recibir en el periodo de cebo. La formulación del pienso de adaptación (ver cuadro 7) incluye restricciones para equilibrar los aportes de ingredientes concentrados y fibrosos. Los primeros garantizan una alta fermentabilidad y una elevada producción de ácidos grasos volátiles para estimular el crecimiento de las papilas ruminales, mientras que el aporte de los segundos sirve de estímulo táctil para promover la motilidad ruminal y la absorción.

Durante el periodo de cebo propiamente dicho los terneros procedentes de ambos sistemas de producción reciben un pienso de ‘**crecimiento**’ hasta los 300-350 kg de peso vivo. Posteriormente, los animales son alimentados con un pienso de ‘**acabado**’ hasta alcanzar el peso de sacrificio (350-400 kg para ternera rosada y 450-500 kg para los añojos). Ambos piensos se ofrecen junto con paja a voluntad para estimular la motilidad ruminal y controlar la incidencia de problemas digestivos.

El consumo diario de paja se estima que aumenta con la edad desde 0,3-0,6 kg/d en el periodo entre 100 y 300 kg, hasta 0,8-1,8 kg/d en el periodo entre 300 y 420 kg de peso vivo (Bacha et al., 2005). Con respecto a los piensos de iniciación, la concentración energética de los piensos de crecimiento y acabado va aumentando con la edad, mientras que la concentración proteica sigue la tendencia contraria (ver cuadro 7).

Cuadro 7.- Composición química, valor nutritivo y contenido en ingredientes de piensos para la producción de carne rosada (Bacha, 1999; Bacha et al., 2005 y García-Rebollar et al., 2008)

	Tipo de pienso			
	Iniciación mamones (<200 kg)	Adaptación pasteros (14-21 d)	Crecimiento (200-350 kg)	Acabado (> 350 kg)
UF carne/kg	0,99-1,00	0,95-0,98	1,00-1,02	1,02-1,05
Proteína, %	18-20	12-15	15-16	14-15
Almidón, %	30-35	25-30	30-40	35-45
Grasa, %	3-5	3-5	3-6	3-6
FND, %	10-15	30-35	15-25	15-25
<i>Ingredientes (%)</i>				
Cebada	25-35	25-30	35-45	35-45
Maíz	25-35	8-15	20-30	20-30
Soja 44	18-22	5-10	14-18	12-16
Subproductos*	15-20	40-60	12-20	12-20
Grasas	1-2	0-1	1-2	2-3

*Salvado de trigo, gluten-20, cascarilla de soja, pulpas

Todos los piensos de cebo intensivo de terneros están basados en el uso de cereales que constituyen habitualmente más del 60% del total de ingredientes. Generalmente se recomienda combinar el uso de almidón fácilmente fermentable (cebada, trigo, centeno) con almidón de fermentación más lenta (maíz), al objeto de reducir la incidencia de problemas de acidosis y meteorismo, especialmente desde la prohibición del uso de antibióticos de tipo ionóforo en la UE. Para la elaboración de los piensos se recurre también a harina de soja, subproductos de cereales (salvado de trigo, gluten de maíz, harina de galletas), subproductos de leguminosas (cascarilla de soja, garrofa) y grasas. Según las zonas se emplea pulpa de remolacha, guisantes y harinas de girasol o de palmiste.

7.2.- Producción de leche de vaca

En las zonas más productoras de leche (Galicia, Cornisa Cantábrica y Norte de Castilla y León), la alimentación de las vacas se basa en parte en el consumo de forrajes húmedos (silos de hierba y maíz, hierba verde) y las producciones de leche por vaca tienden a ser moderadas (6.000-7.000 kg/año). En cambio, en las zonas de regadío y en las granjas próximas a las grandes concentraciones urbanas, la alimentación incluye una mayor proporción de ingredientes secos (concentrados, heno de alfalfa y coproductos de alta calidad), y la productividad de los animales tiende a ser superior (8.000-10.000 kg/año).

En el cuadro 8 se muestra el efecto del nivel de producción de leche sobre la capacidad de ingestión y las necesidades de algunos nutrientes, así como cambios típicos acordes en la composición en ingredientes de las raciones, según las recomendaciones del National Research Council (2001).

Cuadro 8.- Composición química, valor nutritivo y contenido en ingredientes de raciones para la producción de leche según diferentes sistemas (NRC, 2001).

Producción kg/vaca y d	Sistema		
	25	35	45
Consumo MS kg/d	20,3	23,6	26,9
<i>Concentración ración</i>			
ENI (Mcal/kg MS)	1,37	1,47	1,55
PB Metabolizable %MS	9,2	10,2	11,0
PB Degradable %MS	9,5	9,7	9,8
PB Indegradable %MS	4,6	5,5	6,2
<i>Ingredientes, kg MS/d</i>			
Silos maíz y sorgo	8,48	8,21	7,87
Silo Leguminosas	3,85	4,57	
Heno Leguminosas			6,16
Heno gramíneas	4,47	3,21	1,85
Maíz grano	1,80	4,33	7,08
Harina soja	1,01	1,62	1,41
Semilla algodón			2,53

8.- PROPUESTA DE VALORES DE REFERENCIA PARA LA GANADERÍA DE VACUNO EN ESPAÑA SEGÚN SISTEMA DE PRODUCCIÓN

La ecuación de predicción de las pérdidas de metano, determinada a partir de la revisión bibliográfica realizada en este trabajo (figura 9) ha sido utilizada para estimar los valores correspondientes a los sistemas de alimentación que se emplean en España. En el cuadro 9 se presenta un ejemplo de cálculo para las principales etapas del periodo de cebo de terneros. Los valores de energía bruta (EB), digestibilidad de la energía (dE) y energía digestible (ED) de los diferentes ingredientes se han obtenido de las tablas del INRA (2007) y se han ponderado para una composición típica de piensos de iniciación, crecimiento y acabado, asumiendo además que las raciones están constituidas por un 90% de pienso y un 10% de paja de cereales. Como puede apreciarse, los valores estimados por la ecuación son similares en todos los casos, encontrándose en el entorno de un 4,7% de la EB ingerida.

Cuadro 9.- Estimación de la producción de metano en terneros en cebo alimentados con dietas intensivas.

Pienso iniciación				
Ingrediente	%	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	30	3,86	86	3,32
Cebada	30	3,81	81	3,08
Soja 44	20	4,08	92	3,75
cascarilla soja	10	3,89	80	3,11
Salvado	6,5	4	76	3,04
Manteca	1,5	9,4	80	7,52
Corrector vitamínico mineral	2	0		0
Total pienso		3,77	84,5	3,18
Paja		4,04	41	1,66
90% pienso+10% paja			80,1	
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	4,67		
Pienso crecimiento				
Ingrediente	%	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	25,4	3,86	86	3,32
Cebada	40	3,81	81	3,09
Soja 44	16,5	4,08	92	3,75
cascarilla soja	10	3,89	80	3,11
Salvado	4,3	4	76	3,04
Manteca	1,2	9,4	80	7,52
Corrector vitamínico mineral	2,6	0		0
Total pienso		3,74	84	3,14
Paja		4,04	41	1,66
90% pienso+10% paja			79,7	
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	4,71		
Pienso acabado				
Ingrediente	%	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	24,8	3,86	86	3,32
Cebada	40	3,81	81	3,09
Soja 44	13,7	4,08	92	3,75
Cascarilla soja	10	3,89	80	3,11
Salvado	7	4	76	3,04
Manteca	2,3	9,4	80	7,52
Corrector vitamínico mineral	2,2	0		0
Total pienso		3,71	83,5	3,1
Paja		4,04	41	1,66
90% pienso+10% paja			79,2	
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	4,75		

Esta estimación podría todavía reducirse si se aceptan los resultados de Beauchemin y Mc Ginn (2005), según los cuales la sustitución completa de grano de cebada por grano de maíz en piensos de cebo reduce la producción de metano en alrededor de un 30% como consecuencia de su menor degradabilidad en el rumen. Aplicando estas correcciones a una tasa característica de sustitución de cebada por maíz de alrededor de un tercio en los sistemas de alimentación utilizados en España (ver cuadro 7), resultaría una estimación final de la producción de metano de alrededor de un 4,2% de la EB ingerida. Además, los piensos de cebo españoles suelen estar suplementados con grasa (generalmente manteca, con un 56% de ácidos grasos insaturados), lo que implica según se ha mencionado anteriormente un efecto negativo adicional sobre la digestión de la fibra y la formación de metano.

Esta estimación coincide apreciablemente con los valores determinados experimentalmente con sistemas intensivos similares para el periodo de acabado (sistemas feed-lot) en Estados Unidos (4,2%; Johnson et al., 1994), Canadá (3,2-4,2%; Nkrumah et al., 2006) e Irlanda (3,9%; Jordan et al., 2006a; Jordan et al., 2006b). Valores inferiores (en torno a un 3%) han sido obtenidos con piensos concentrados de acabado en base a maíz (Beauchemin y Mc Ginn, 2005) o avena (Harper et al., 1999) y son también los propuestos por el IPCC (2006) para estimar emisiones de terneros alimentados con sistemas feedlot.

Los valores de emisiones de metano obtenidos con raciones concentradas contrastan con los determinados en terneros alimentados con raciones extensivas en base a forrajes. Así, si la ecuación de la figura 10 se aplica a una dieta mixta constituida por un 90% de forrajes (dE = 60%) y un 10% de concentrados (dE = 75%) el valor predicho para la proporción de EB ingerida que se pierde en forma de metano aumenta hasta un 6,5%. Esta estimación coincide con el valor propuesto por el IPCC (2006) para estimar las emisiones de terneros en cebo extensivo y es incluso inferior a algunas determinaciones realizadas con raciones forrajeras basadas en heno de bromo (7,6%; Johnson et al., 1994), silo de hierba (8%, Kirkpatrick et al., 1997; Jordan et al., 2006), hierba (7,7-8,4%; Harper et al., 1999) y silo de cebada (6,5-7,9%; Beauchemin y Mc Ginn, 2006b).

La comparación de emisiones de metano entre sistemas de producción debe además tener en cuenta que los consumos de materia seca y energía bruta son sensiblemente superiores en los sistemas extensivos que en los intensivos, como consecuencia de la peor eficacia de conversión del alimento (ver cuadro 10). Si se acepta una concentración media de 4,42 Mcal de EB/kg MS tanto para alimentos concentrados como para forrajes (INRA, 2007), resultan las estimaciones de consumo de energía y de producción de metano que se muestran en el cuadro 11 para sistemas de cebo basados en cereales, hierba o silo de maíz. De estos cálculos se deduce que los valores de emisiones totales de metano por ternero en un sistema cereal/paja se reducen a menos de la mitad (un 38%) con respecto a los

correspondientes a terneros alimentados en base a hierba y a un 66% con respecto a sistemas intermedios basados en silo de maíz.

Cuadro 10.- Efecto del sistema de producción de terneros de carne de raza frisona sobre el peso al sacrificio, el consumo de materia seca y la eficacia alimenticia durante el periodo de cebo (según Kay, 1979)

Sistema	Kg MS ingerida/ternero		Ganancia de peso (kg)	Índice conversión ⁽¹⁾
	Concentrado	Forraje		
Cereal	1578	175 ⁽²⁾	335	4,7
Hierba-18 meses	902	2070	380	7,8
Silo maíz	335	1800	395	5,4

¹kg MS/kg ganancia peso ²Paja de cereal

Cuadro 11.- Efecto del sistema de producción de terneros de carne de raza frisona sobre las emisiones de metano durante el periodo de cebo.

Sistema	ingestión/ternero			CH ₄ /EBi, %	Mcal CH ₄ /ternero
	kg MS	Mcal EB	dE, %		
Cereal-paja	1753	7748	80	4,2	325
Hierba-18 meses	2972	13136	67	6,5	853
Silo maíz	2135	9436	74	5,2	491

Un procedimiento similar se ha seguido (ver cuadro 12) para estimar las variaciones de la producción de metano de vacas de leche según los diversos sistemas de producción descritos en el cuadro 8 (NRC, 2001) y utilizando de nuevo los valores de energía bruta (EB), digestibilidad de la energía (dE) y energía digestible (ED) de los diferentes ingredientes de las tablas del INRA (2007).

Como puede apreciarse, un incremento de la productividad asociado a un aumento de la concentración de nutrientes y de la digestibilidad de la energía de la ración conduce a una disminución lineal de las emisiones de CH₄ que pasan de representar un 6% de la EB ingerida en vacas que producen 25 kg/d a un 5,5% en vacas de alta producción (45 kg/d). Los valores son ligeramente inferiores al valor promedio propuesto por el IPCC (2006) para vacas de leche incluyendo a sus crías (6,5%).

Cuadro 12.- Estimación de la producción de metano en vacas de leche a diferentes niveles de producción.**25 kg de leche/día**

Ingrediente	% MS	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	9	4,46	86	3,83
Soja 44	5	4,66	92	4,29
Silo de maíz	42	4,45	69	3,07
Alfalfa	20	4,31	59	2,54
Heno gramíneas	23	4,29	53	2,27
Corrector vitamínico mineral	1	0		0
Total ración		4,35	66,1	2,8
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	6,0		

35 kg de leche/día

Ingrediente	%	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	18,5	4,46	86	3,83
Soja 44	7	4,66	92	4,29
Silo de maíz	35	4,45	69	3,07
Alfalfa	20	4,31	59	2,54
Heno gramíneas	18	4,29	53	2,27
Corrector vitamínico mineral	1,5	0		0
Total ración	100	4,34	69,1	3,00
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	5,72		

45 kg de leche/día

Ingrediente	%	EB, Mcal/kg	dE, %	ED, Mcal/kg
Maíz	25,5	4,46	86	3,83
Soja 44	5	4,66	92	4,29
Silo maíz	29	4,45	69	3,07
Alfalfa	23	4,31	59	2,54
Heno gramíneas	7	4,29	53	2,27
Semilla algodón	9	5,75	66	3,79
Corrector vitamínico mineral	1,5	0		0
Total ración	100	4,47	70,9	3,17
Ec. Fig 10	%CH ₄ /EB	5,55		

Además, debe tenerse en cuenta que si las pérdidas de metano se expresan por kg de leche producida (cuadro 13), la disminución de las emisiones es relativamente mayor (un 30% entre casos extremos), de forma similar a lo que ocurre en producción de carne.

Cuadro 13.- Estimación de las emisiones de metano por kg de leche en diferentes sistemas de producción (elaborado a partir de datos recogidos en los cuadros 8 y 12)

Producción de leche (kg/d)	MS ingerida (kg/d)	EB ingerida (Mcal/d)	CH ₄ (Mcal/d)	CH ₄ (Mcal/kg leche)
25	20,3	88,3	5,30	0,212
35	23,6	102,4	5,86	0,167
45	26,9	120,2	6,67	0,148

9.- CONCLUSIONES

La producción ganadera contribuye en España en una proporción relevante (pero limitada) al total de emisiones de gases con efecto invernadero: del orden de un 5% del total en CO₂ equivalente. La contaminación más importante se debe a la liberación de metano, que se produce como resultado bien directamente de la fermentación entérica del alimento, bien indirectamente de la fermentación del estiércol. Los rumiantes son los principales responsables de la emisión directa de metano (alrededor de un 3% de las emisiones totales en España). Numerosos factores ligados al tipo de animal y a su alimentación modifican la producción de metano en rumiantes, que llega a oscilar entre un 2 y un 10% de la EB ingerida en la bibliografía consultada. Los resultados obtenidos en trabajos recientes muestran que una alimentación más concentrada (almidón, grasa), así como el uso de algunos aditivos, contribuye a disminuir las pérdidas en valor absoluto y que un incremento del nivel de producción reduce adicionalmente las emisiones si éstas se expresan en relación a la cantidad de producto (leche, carne) obtenido.

10.- REFERENCIAS

- ANIMUT, G., PUCHALA, R., GOETSCH, A.L., PATRA, A.K., SAHLU, T., VAREL, V.H., WELLS, J. 2008a. *Anim. Feed Sci. Technol.* **144**, 212-227.
- ANIMUT, G., PUCHALA, R., GOETSCH, A.L., PATRA, A.K., SAHLU, T., VAREL, V.H., WELLS, J. 2008b. *Anim. Feed Sci. Technol.* **144**, 228-241.
- ASANUMA, N., IWAMOTO, M., HINO, T. 1999. *J. Dairy Sci.* **82**, 780-787.
- BACHA, F. 1999. En: *XV Curso de Especialización FEDNA*. pp. 279-301.
- BACHA, F., LLANES, N., BUENO, E. 2005. En: *XXI Curso de Especialización FEDNA*. pp. 133-158.

- BEAUCHEMIN, K.A., MCGINN, S. M. 2005. *J. Anim. Sci.* 83, 653-661.
- BEAUCHEMIN, K.A., MCGINN, S.M. 2006a. *International Congress Series* 1293, 152-155.
- BEAUCHEMIN, K.A., MCGINN, S.M. 2006b. *J. Anim. Sci.* 84, 1489-1496.
- BLAXTER, K.L. 1964. *Metabolismo Energético de los Rumiantes*. Ed. Acribia, Zaragoza. 314 pp.
- BLAXTER, K.L., CLAPPERTON, J.L. 1965. *Br. J. Nutr.* 19, 511-522.
- CAJA, G., GONZÁLEZ, E., FLORES, C., CARRO, M.D., ALBANELL, E. 2003. En: *XIX Curso de Especialización FEDNA*. pp. 1183-214.
- CALSAMIGLIA, S., CASTILLEJOS, L., BUSQUET, M. 2005. En: *XXI Curso de Especialización FEDNA*. pp. 161-185.
- CARRO, M.D., LÓPEZ, S., VALDÉS, C., OVEJERO, F.J. 1999. *Anim. Feed Sci. Technol.* 79, 279-288.
- CARRO, M.D., RANILLA, M.J. 2003. *Br. J. Nutr.* 89, 181-188.
- CARULLA, J.E., KREUZER, M., MACHMULLER, A., HESS, H.D. 2005. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 961-970.
- CZERKAWSKI, J.W. 1986. *An introduction to rumen studies*. Pergamon Press Ltd., Oxford. 236 pp.
- CHATELLIER, V., VERITE, R. 2003. *INRA Productions Animales*, 16, 231-249.
- DEMEYER, D. I., VAN NEVEL, C. J., HENDERICKX, H. K., MARTIN, J. 1969. En: *Energy Metabolism of Farm Animals*. K.L. Blaxter, J. Kielanowski, G. Thorbek (Eds). European Association for Animal Production. No. 12, 139-147.
- ELLIS, J.L., KEBREAB, E., ODONGO, N.E., MCBRIDE, B.W., OKINE, E.K., FRANCE, J. 2007. *J. Dairy Sci.* 90, 3456-3466.
- ESTERMANN, B.L., SUTTER, F., SCHLEGEL, P.O., ERDIN, D., WETTSTEIN, H.R., KREUZER, M. 2002. *J. Anim. Sci.* 80, 1124-1134.
- GARCÍA-REBOLLAR, P., BACHA, F., JIMENO, V. 2008. En: *Producción de ganado vacuno de carne y tipos comerciales en España*. C. Sañudo, V. Jimeno, M. Cervino (ed). Ed. Schering-Plough. pp 75-88.
- GIGER-REVERDIN, S., MORAND-FEHR, P., TRAN, G. 2003. *Liv. Prod. Sci.* 82, 73-79.
- HACALA. 2006. *Les ruminants et le réchauffement climatique*. Institut de l'Élevage Adame. Octobre. 141 pp.
- HARPER, L.A., DENMEAD, O.T., FRENEY, J.R., BYERS, F.M. 1999. *J. Anim. Sci.* 77, 1392-1401.
- HESS, H.D., MONSALVE, L.M., LASCANO, C.E., CARULLA, J.E., DIAZ, T.E., DREUZER, M. 2003. *Aust. J. Agric. Res.* 54, 703-713.
- HOLTER, J.B., YOUNG, J. 1992. *J. Dairy Sci.* 75, 2165-2175.
- INRA. 1978. *Alimentation des Ruminants*. Ed. INRA Publications, Versailles, Francia. 597 pp.
- INRA. 1981. *Alimentación de los Rumiantes*. Ed. Mundi Prensa, Madrid. 697 pp.
- INRA. 2007. *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Ed. Quae, Versailles, 307 pp.

- IPCC. 2006. En: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and other Land Use. Hayama (Kanagawa), Japan, pp. 87.
- JOHNSON, D.E., ABO-OMAR, J.S., SAA, C.F., CARMEAN, B.R. 1994. En: *Energy metabolism of Farm Animals*. EAAP Publication 76, 339-342.
- JOHNSON, K.A., JOHNSON, D.E. 1995. *J. Anim. Sci.* 73, 2483-2492.
- JOHNSON, K.A., JOHNSON, D.E. 2006. *Greenhouse gas inventories from animal agriculture for the United States*. International Congress Series 1293, 21-28.
- JORDAN, E., KENNY, D., HAWKINS, M., MALONE, R., LOVETT, D.K., O'MARA, F.P. 2006. *J. Anim. Sci.* 84, 2418-2425.
- JORDAN, E., LOVETT, D.K., MONAHAN, F.J., CALLAN, J., FLYNN, B., O'MARA, F.P. 2006. *J. Anim. Sci.* 84, 162-170.
- KAY, M. 1979. En: *European Congress for improved beef productivity*.
- KHALIL, N.A.K., RASMUSSEN, R.A., MORAES, F. 1993. *J. Geophys. Res.* 98, 14753.
- KIRCHGESSNER, M., WINDISCH, W., MÜLLER, H.L. 1994. En: *Energy metabolism of Farm Animals*. EAAP Publication 76, 399-402.
- KIRKPATRICK, D.E., STEEN, R. W.J., UNSWORTH, E.F. 1997. *Liv. Prod. Sci.* 51, 151-164.
- KREUZER, M., HINDRICHSEN, I.K. 2006. *Methane mitigation in ruminants by dietary means: The role of their methane emission from manure*. International Congress Series 1293, 199-208.
- LANA, R.P., RUSSELL, J.B., VAN AMBURGH, M.E. 1998. *J. Anim. Sci.* 76, 2190-2196.
- LASSEY, K.R. 2007. *Agricultural and Forest Micrometeorology*, 124, 120-132.
- LOVETT, D., LOVELL, S., STACK, L., CALLAN, J., FINALY, M., CONOLLY, J., O'MARA, F.P. 2003. *Liv. Prod. Sci.* 84, 135-146.
- LOVETT, D.K., STACK, L.J., LOVELL, S., CALLAN, J., FLYNN, B., HAWKINS, M., O'MARA, F.P. 2004. *J. Dairy Sci.* 88, 2836-2842.
- LOVETT, D.K., STACK, L.J., LOVELL, S., CALLAN, J., FLYNN, B., HAWKINS, M., O'MARA, F.P. 2005. *J. Dairy Sci.* 88, 2836-2842.
- MACHMÜLLER, A., CLARK, H. 2006. *First results of a meta-analysis of the methane emission data of New Zealand ruminants*. International Congress Series 1293, 54-57.
- MARTIN, S., SEELAND, G. 1999. *Liv. Prod. Sci.* 61, 171-178.
- McGINN, S.M., BEAUCHEMIN, K.A., COATES, T., COLOMBATTO, D. 2004. *J. Anim. Sci.* 82, 3346-3356.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 2007a. *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España. Años 1990-2005*. Comunicación a la Comisión Europea. Decisiones 280/2004/CE y 2005/166/CE. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, Spain. pp. 330.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 2007b. *Inventario de gases de efecto invernadero de España*. Edición 2007 (Serie 1990-2005). Sumario de resultados. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, Spain. pp. 30.
- MOE, P.W., TYRRELL, H.F. 1979. *J. Dairy Sci.* 62, 1583-1586.

- MOSS, A.R., GIVENS, D.I., GARNSWORTHY, P.C. 1995. *Anim. Feed Sci. Technol.* 55, 9-33.
- MOSS, A.R., JOUANY, J.P., NEWBOLD, J. 2000. *Annales Zootech.* 49, 231-253.
- NKRUMAH, J.D., OKINE, E.K., MATHISON, G.W., SCHMID, K., LI, C., BASARAB, J.A., PRICE, M. A., WANG, Z., MOORE, S.S. 2006. *J. Anim. Sci.* 84, 145-153.
- NRC 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. National Academy Press. Washington, D.C. 381 pp.
- OLDHAM, J.D., BUTTERY, P.J., SWAN, H., LEWIS, D. 1977. *J. Agric. Sci.* 89, 467.
- PUCHALA, R., MIN, B.R., GOETSCH, A.L., SAHLU, T. 2005. *J. Anim. Sci.* 83, 182-186.
- RHODE, H. 1990. *Science* 249, 1217.
- SAUER, F.D., FELLNER, V., KINSMAN, R., KRAMER, J.K.G., JACKSON, H.A., LEE, A.J., CHEN, S. 1998. *J. Anim. Sci.* 76, 906-914.
- SAUVANT, D., PEREZ, J.M., TRAN, G. 2004. *Tablas de composición y de valor nutritivo de las materias primas destinadas a los animales de interés ganadero*. INRA. Ediciones Mundi Prensa, Madrid. 310 pp.
- SOUSSANA, J.F., LOISEAU, P., VUICHARD, N., CESCHIA, E., BALESSENT, J., CHEVALLIER, T., ARROUAYS, D. 2004. *Soil Use and Management* 20, 219-230.
- UPV. 2006. *Metodología para la estimación de las emisiones a la atmósfera del sector agrario para el Inventario Nacional de Emisiones*. Ministerio de Medio Ambiente. 132 pp.
- VAN SOEST, P.J. 1994. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2º Ed. Comstock. Cornell University Press. 476 pp.
- VERMOREL, M. 1995. *INRA Productions Animales* 8 (4), 265-272.
- WILKERSON, V.A., CASPER, D.P., MERTENS, D.R. 1995. *J. Dairy Sci.* 78, 2402-2414.
- YAN, T., AGNEW, R.E., GORDON, F.J., PORTER, M.G. 2000. *Liv. Prod. Sci.* 64, 253-263.
- ZHANG, C.M., GUO, Y.Q., YUAN, Z.P., WU, Y.M., WANG, J.K., LIU, J.X., ZHU, W.Y. 2008. *Anim. Feed Sci. Technol.* doi: 10.1016/j.anifeedsci.2008.01.005.