

M. Doreau, V. Fievez, A. Troegeler-Meynadier, F. Glasser. 2012. **Métabolisme ruminal et digestion des acides gras longs chez le ruminant : le point des connaissances récentes**. INRA Prod. Anim., 25 (4), 361-374

Resumen

Introducción

La complementación de la ración con lípidos tiene dos objetivos: a) aumentar el valor nutritivo de la ración, b) variar el valor nutritivo de la leche y/o de la carne.

En lo que respecta al objetivo b), nos interesa una ingesta baja en AG saturados en favor de los AGPI (ácidos grasos poliinsaturados) de la serie n-3 (omega-3). Prevención enfermedades cardiovasculares, y, en el caso de los niños la serie n-3 ayuda al crecimiento, prevención, también, de enfermedades mentales.

Sin embargo, la presencia de AGPI en la leche, y en los productos lácteos, implican cambios en el punto de fusión, y en la estabilidad, generando problemas en los tratamientos tecnológicos, más oxidación, menos calidad sensorial.

- Monogástricos: AG ingeridos ↔ AG absorbidos
- Rumiantes: AG ingeridos ≠ AG absorbidos. Los AGI (insaturados) son hidrogenados, isomerizados, en el rumen. Y, por todo ello, los productos de los rumiantes (leche y carne) tienen AG que no estaban en la ración. Entre ellos, los CLA (ácido linoleico conjugado), AG monoinsaturados *trans*, los cuales tienen un papel importante en la salud humana.

El ácido ruménico es un isómero de CLA (c9, t11-18:2) y previene la aparición de cáncer (pruebas con animales, no demostrado en humanos).

Los AG *trans* tienen efecto negativo en la salud humana. Aunque el ácido vaccínico (isómero t11-18:1) está presente en los productos de los rumiantes y no es perjudicial, al contrario, parece que tiene efectos positivos (baja el contenido de colesterol). Podemos decir, por tanto, que los AG *trans* de los productos parcialmente hidrogenados del tipo margarina (t9-18:1 y t10-18:1) serían perjudiciales debido a que bajan la fracción HDL del colesterol (HDL, lipoproteína alta densidad).

Biohidrogenación en el rumen ... absorción en el intestino ... transporte sanguíneo (forma de lipoproteínas) ... captación AG en glándula mamaria, captación AG por los músculos, captación AG en tejidos adiposos, captación AG en hígado.

Fuentes lipídicas en la alimentación del rumiante

Cereales, semillas de oleaginosas: TG (triglicéridos)

Forrajes: Galactolípidos en las partes verdes y Fosfolípidos en las membranas celulares

Forrajes y concentrados menos del 4% de lípidos.

Hierba en primavera y otoño (países templados) hasta el 3% de AG, y en verano menos del 1%. El ácido linolénico (18:3 n-3) es el principal AG de la hierba fresca, el palmítico (16:0) y el linoleico (18:2 n-6) son los otros.

Contenido AG: menos variación entre especies que entre estados fenológicos, igualmente, menos que entre modos de conservación para una misma especie.

Ensilaje: no modifica contenido AG ni el perfil. Sí que cambiará la proporción de lípidos debido a la lipólisis, serán AG no esterificados (no TG).

Henificar: modifica contenido AG y el perfil, por pérdida de hojas y por oxidación. El linolénico baja.

Concentrados: los tratamientos térmicos - extrusión - no modifican la composición de AG. Los aceites y grasas de oleaginosas tratadas con formol aseguran la protección de la biodidrogenación el rumen (lo que interesa es que los AG no sean biohidrogenados en el rumen).

Los productos de origen marino - aceites de pescado, algas - son susceptibles de emplearse en rumiantes.

Otros tratamientos que previenen la biohidrogenación son los jabones cálcicos de AG (a partir del aceite de palma y derivados y otros aceites vegetales).

Lipólisis y biohidrogenación

Mecanismos complejos.

Biohidrogenación = {reacciones bioquímicas | rumen | AGI → AG saturados}

Reacciones bioquímicas (isomerización e hidrogenación a los dobles enlaces). Previamente debe haber una lipólisis (TG, Galactolípidos, Fosfolípidos → AG libres).

Por otra parte, un cierto número de AG - saturados y monoinsaturados - son asimilados por los microorganismos ruminales, los cuales sintetizan los propios AG.

Lipólisis

Las bacterias la realizan.

Anaerovibrio lipolytica: actúa junto con una lipasa que está activada sobre los TG, pero no lo está sobre los galactolípidos ni sobre los fosfolípidos.

Bacterias *butyrivibrio*2 tienen actividad esterasa y pueden romper fosfolípidos y galactolípidos, obteniendo los AG libres.

En los protozoos también se ha detectado actividad lipolítica, sin embargo no se ha determinado su alcance.

La lipólisis ruminal no produce intermediarios (mono o diglicéridos) y, por tanto, los AG libres resultantes son la fracción lipídica mayoritaria en el rumen y el duodeno, igualmente cuando los animales comen dietas con grandes cantidades de grasa.

Biohidrogenación ruminal de los AG insaturados (18C)

El linolénico es isomerizado y da c9, 711, c15-18:3, y siguen tres etapas: a) t11, c15-18: 2, b) t11-18: 1 (vaccínico) y c) 18:0 (esteárico) que es el producto final de la biohidrogenación en todos los casos.

El oleico sólo pasa por una etapa para llegar al esteárico, pero puede producir compuestos menores como el ácido hidroxisteárico y el ácido ketosteárico.

Hay, en cualquier caso, en el metabolismo de AGI diferentes vías, en general complejas. Se dan numerosos isómeros de los 18:1, 18:2 y 18:3 presentes en el rumen y el duodeno.

Biohidrogenación ruminal de los AG insaturados (20 i 22C)

EPA (eicosapentanoico 20:5 n-3), DHA (docosahexaenoico 22:6 n-3). Son ácidos grasos derivados de fuentes marinas.

EPA → c11 20:1; c13 20:1, c14 20:1, c15 20:1

DHA → c11 22:1; c13 22:1; c14 22:1; c15 22:1

Los microorganismos ruminales realizan la biohidrogenación

La biohidrogenación de los AG de 18C es un fenómeno complejo y es la acción de los enzimas sintetizados por las bacterias ruminales.

Los protozoos ruminales, en cambio, no intervienen en las vías de biohidrogenación.

Amplitud de la biohidrogenación y efectos de los factores alimentarios

La biohidrogenación los AG insaturados (que es la desaparición de los AGI ingeridos) se mide por la diferencia $Q_{AGI \text{ ingeridos}} - Q_{AGI \text{ fluyen al duodeno}}$.

La desaparición (biohidrogenación) es muy alta si los lípidos ingeridos no están protegidos.

% Biohidrogenación del **linolénico** = 87

% Biohidrogenación del **linoleico** = 86

% Biohidrogenación del oleico = 57 a 85 (no hay datos suficientes)

La etapa limitante de la desaparición de los AGI ingeridos no es la lipólisis (excepto si están protegidos), ya que *in vivo* la lipólisis es casi completa en la mayor parte de las raciones, cualquiera que sean las condiciones físicas y químicas del rumen. Una excepción probable es la alimentación con trébol violeta que contiene la polifenoloxidasasa - enzima que inhibe la actividad lipolítica.

La amplitud de la biohidrogenación - desaparición de los AGI ingeridos - casi no depende de la cantidad o de la naturaleza de los AG de los lípidos alimentarios, menos en el caso de una protección química contra los ataques de los microbios o por la ingestión de granos enteros de oleaginosas.

El factor de variación en la biohidrogenación es el % de concentrados en la ración. Si es superior al 70% baja la biohidrogenación, de modo que para el **linolénico** estaría entre el 50 y 80%, y para el **linoleico** entre 35 y 60%. Esto puede ser debido a la bajada en el pH ruminal que hará que la lipólisis sea menor. Sin embargo, un pH bajo, por debajo de la normalidad, hará que la tasa de biohidrogenación de los AGI también baje y aumente el ratio t10/t11 de los 18:1 y los CLA para la producción de t10-18:1. Este proceso hace bajar mucho la tasa de grasa de la leche.

Se ha demostrado que un pH débil hace bajar la tasa de isomerización del **linoleico** en CLA de tipo c9, t11-18:2 y disminuye igualmente la saturación hacia esteárico provocando una acumulación 18:1 *trans*.

Flujo y composición de los AG a la salida del rumen

- Flujo AG (saliendo del rumen) \approx Flujo AG ingeridos, para la mayoría de regímenes alimenticios en rumiantes.
- Flujo AG (saliendo del rumen) $>$ Flujo AG ingeridos, regímenes pobres en lípidos. Hay síntesis neta de AG, y se observa una eficacia débil de la síntesis microbiana
- Flujo AG (saliendo del rumen) $<$ Flujo AG ingeridos, regímenes ricos en lípidos. Hay desaparición de AG (mecanismos aún poco conocidos)

AG cadena media y palmítico: La proporción de este grupo es similar a {AG ingeridos} y {AG (saliendo del rumen)}

Raciones enriquecidas con aceite de coco o aceite de palma (*Elaeis guineensis*): {AG (saliendo del rumen)} = ácido mirístico (14:0), ácido láurico (12:0)

Raciones enriquecidas con aceite de palma o con jabones de palma: {AG (saliendo del rumen)} = ácido palmítico (16:0).

Debido a la biohidrogenación las raciones ricas en **linolénico** y en **linoleico** no dan más que débiles cantidades (flujo) de estos ácidos en el duodeno.

- Ejemplo: en 10 raciones ricas en grano de lino (aplastados, micronizados, extrusionados, aceite, etc.):

Ácido **linolénico** representa 30% {AG ingeridos} y sólo 3% {AG (saliendo del rumen)}

- Igualmente, raciones ricas en (cereales, torta girasol):

Ácido **linoleico** representa 60% {AG ingeridos} y sólo 5% {AG (saliendo del rumen)}

El esteárico (18:0) representa el 70% de los ácidos de 18C en {AG (saliendo del rumen)}. En cambio, en raciones con aceite de pescado baja al 30%, con un aumento del 18:1 trans.

De todos los ácidos intermediarios del proceso de la biohidrogenación ruminal de los {AGI ingeridos} algunos no se encuentran en el duodeno o, en todo caso, en trazas. Son metabolizados en otros AG.

Es el caso del ácido **linolénico** conjugado (CLA | c9, t11, c15-18: 3) que rápidamente se metaboliza.

Los CLA \approx menos del 5% {AG (saliendo del rumen)}. El ruménico (c9, t11-18: 2), que es isómero del CLA representa menos de la mitad de los CLA totales duodenales, y menos del 10% de los isómeros de 18:2 (excluyendo el **linolénico** - c9, c12-18:2 -).

En cuanto a los 18:2 no conjugados, el t11, c15-18:2 está en un 0,5% de los AG duodenales, y llega al 6% con raciones ricas en grano de lino y en alimentos concentrados. De media, este ácido representa el 20% de los isómeros totales de 18:2.

Isómeros *cis* y *trans* de los AG 18:1 en el duodeno

Raciones no complementadas con lípidos: % isómeros *trans* de AG 18:1 64% \pm 16; resto *cis*, en el caso de raciones exclusivas de forrajes: el t10-18:1 no representa más que el 0,5% de los AG duodenales, en el caso de raciones ricas en forrajes el t11-18:1 es mayoritario. Si se aumenta la proporción de concentrados aumenta el % de t10-18:1, y, si se aporta (girasol, soja, que tienen **linolénico**) provocan una desviación de la biohidrogenación del ácido **linolénico** de la vía t11

hacia la t10 (eso son las mismas condiciones que favorecen la producción de t10, c12-18:2). En este caso, el aumento de la proporción de t10-18:1 puede ser muy importante, este isómero puede llegar al 20% del AG de 18C duodenales. En consecuencia, la leche salida de este tipo de raciones presenta un perfil en AG *trans* muy próximo a AG *trans* de los productos industriales (tipo margarina) que tienen efectos muy dañinos para la salud humana.

Raciones con lípidos: % isómeros *trans* de AG 18:1 72% ± 17; resto *cis*.

Las bacterias y protozoos pueden sintetizar y, también, incorporar AG

La incorporación es, entre otros, del ácido **linoleico** con los lípidos polares o en forma libre. Si en el rumen hay muchos AG libres, la incorporación es más amplia que la síntesis, y si la ración es pobre en lípidos la síntesis es más importante.

El flujo de AG bacterianos en el duodeno es superior al flujo de AG protozoos, ya que los protozoos, mayoritariamente, quedan en el rumen.

Raciones pobres en lípidos: el flujo de AG bacterianos en el duodeno representa el 60% de los AG en el duodeno.

Raciones ricas en lípidos: el flujo de AG bacterianos en el duodeno representa menos del 50% de los AG en el duodeno.

Los AG bacterianos son de cadena impar o ramificada (15:0, 17:0, iso-15:0, iso-17:0, anteiso-15:0, anteiso-17:0) sintetizados a partir del propionato y residuos ramificados de ácidos aminados.

Protección de los lípidos contra la biohidrogenación

Protección natural

Granos enteros, la protección depende de la dureza del grano y del tamaño de las partículas - enteros, aplastados, molidos).

Soja, girasol: buena protección

Lino: mala protección

Colza: no son tan digestibles y, eso, les hace de menos uso

El lino extrusionado a temperaturas moderadas (140 a 150 ° C) si lo comparamos con otros ingredientes extrusionados pobres en AGI, no disminuye la biohidrogenación del ácido **linolénico** en relación a los granos enteros y tiene, sobre todo, tendencia a aumentar los intermediarios de la biohidrogenación, tales como los isómeros *trans*.

Algunos forrajes tienen interés en cuanto a la protección parcial contra la biohidrogenación. El trébol violeta contiene una enzima (polifenoloxidasas) que transforma los difenoles en quinonas, las cuales se juntan con proteínas asegurando una protección parcial contra la biohidrogenación, y, también, contra la lipólisis.

Los taninos de las plantas se juntan con las proteínas y protegen igualmente los lípidos.

Protección con métodos tecnológicos

Tiene como objetivo bajar la velocidad y la amplitud de la biohidrogenación de los lípidos.

- a) Encapsulación de los aceites emulsionantes en una matriz de proteínas tratadas con formol. La cubierta de proteínas protege los lípidos de los ataques de los microorganismos del rumen, luego se disocia en el cuajar, permitiendo la liberación de los lípidos en el intestino delgado. Es el método más eficaz. El límite está en la ruptura de la cubierta y en el mismo proceso de fabricación (coste elevado). En 1977 ya se demostró que con aceite de lino encapsulado se obtenía una leche con el 20% **linoleico** y del 35% en el caso de aceite de cártamo encapsulado. El hecho de ser caro no ha hecho que fuera a más. Aparte de esto, si se aumenta el contenido de AGPI en la leche, baja el punto de fusión, problemas de conservación y en la transformación en lácteos.
- b) Formol, en muchos países está prohibido su uso
- c) Está por confirmar el gel de proteínas del lactoserum
- d) El pretratamiento de los lípidos por emulsión o con sosa pueden dar cierta protección
- e) El tratamiento de granos de oleaginosas con xilosa, basados en la reacción de Maillard, o la absorción de aceite en las fibras minerales no parecen muy eficaces
- f) La protección química bloquea los grupos carboxilos COOH (que si no están libres no hay biohidrogenación); es una manera de parar la biohidrogenación
- g) Jabones cálcicos: muy utilizados para incorporar AG de palma. Se consideran inertes ya que no afectan a la digestión de las fibras en el rumen, igualmente a dosis altas. Sin embargo, no son eficaces para proteger a los AGPI de la biodidrogenación ruminal. Los jabones de calcio también se emplean para proteger CLA sin tener un resultado claro. Los jabones de AGI son disociados para un mismo pH que los AG saturados
- h) Síntesis de amidas a partir de AG. Los AGI están ligados, por una relación amida, a una fuente de amina tal como la butilamina, la etanolamina o el amoníaco. La tasa de protección se ha evaluado por la oleamida (ácido oleico), la butilsojamida y hidroxietilsojamida (AG de soja). Una protección parcial puede ser el origen de un aumento de AGI en la leche. Esta técnica no está empleada sobre el terreno.

Absorción intestinal de los AG

Los AG resultantes del metabolismo ruminal se incorporan al duodeno, en forma absorbida sobre las partículas alimenticias o sobre las bacterias. Los mecanismos de absorción en rumiantes son parecidos a los de los monogástricos, en parte debido a que los AG que llegan al duodeno mayoritariamente lo hacen en forma libre, no esterificados y saturados. La ausencia de monoglicéridos se compensa por la presencia de lisolecitinas en la bilis, producidas por las fosfolipasas a partir de los fosfolípidos bacterianos y/o biliares. Los AG no son absorbidos ni solubilizados por las sales biliares y las lisolecitinas, ya que pasan a una fase micelar que permite la absorción en el yeyuno.

La absorción intestinal de los AG no se puede medir de forma fiable más que entre el duodeno y el íleon terminal, o en las heces, empleando animales con cánula en el duodeno o íleon terminal.

Digestibilidad intestinal AG 55-92%. Muy variable, y no se explica por la ingestión y el perfil de los AG ingeridos.

Digestibilidad aparente: AG (C12 67%, C14 67%, C16 77% y C18 75%)

Digestibilidad aparente de los AG en C18: 74% por C18:0, 72% por C18:2 y 70% por C18:3. Para los 18:1 *cis* (78%) y *trans* (82%).

Digestibilidad aparente de los AG en C20 y C22: hay menos datos, en promedio 70%.

Dada que las diferencias de digestibilidad entre AG son débiles, la composición de los AG absorbidos es cercana a AG que fluyen en el duodeno. Por tanto, el perfil de los AG en el duodeno puede servir para saber la composición de los AG de la leche.