Los microorganismos del rumen y su papel en la fisiología digestiva del rumiante.

Ing. Alexey Díaz Reyes[1], Dra. Juana Luz. Galindo Blanco[2], Dr. Ramón Bocourt Salabarría[2], Ing. Martha Laurencio Silva[1], Dr. C. Manuel Pérez Quintana[1]

[1]Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Facultad de Agronomía. Autopista a Varadero km 3 ½ Matanzas, C.P. 44740, Cuba.
[2]Instituto de Ciencia Animal. Carretera Central Km 47 1/2. San José de las Lajas. La Habana.

Resumen
Se caracterizan los microorganismos del rumen y su papel en la fisiología digestiva del rumiante. Se describen las características generales del sistema digestivo de los rumiantes y sus compartimentos (rumen, retículo, canal reticular o gotera esofágica, omaso y abomaso, intestino). Se profundiza en la fermentación microbiana ruminal del nitrógeno, carbohidratos y lípidos, así como en aspectos relacionados con la absorción en el rumen. Se considera la metanogenésis y su perjuicio al animal. Se enfatiza en la importancia de los microorganismos del rumen y el aporte de proteínas microbianas al metabolismo.

Introducción:

Los animales rumiantes constituyen una importante fuente de alimentos y otros productos para los seres humanos. Estos animales se han adaptado de tal manera que pueden satisfacer sus necesidades energéticas a través de la utilización de los forrajes, los cuales son relativamente abundantes en la superficie terrestre, aspecto que los coloca entre los animales de más alto interés zootécnico.
Los rumiantes son animales poligástricos, es decir, que la estructura anatómica de sus estómagos es compleja por estar formada por 4 compartimentos: retículo, rumen, omaso y abomaso. Los tres primeros se denominan conjuntamente preestómagos y poseen una mucosa aglandular (epitelio sin capacidad de producir jugos con función digestiva). Poseyendo el último de los cuatro (el abomaso) una estructura glandular equivalente a la del estómago simple en los monogástricos (Redondo, 2003).

Dada estas características en su tracto digestivo pueden utilizar los carbohidratos celulósicos procedentes de las plantas y que el hombre y otros animales monogástricos no pueden aprovechar, por carecer de las enzimas digestivas capaces de romper las uniones β1-4 de la glucosa en las cadenas de los polisacáridos estructurales.

La utilización de estos alimentos fibrosos es posible, gracias a la existencia de un preestómago que constituye una cámara de fermentación continua donde una gran población microbiana vive en simbiosis con el animal y le permite al hombre aprovechar de forma indirecta la energía almacenada en las plantas y convertirlas en alimento (carne, leche, etc.).
La comunidad microbiana, que habita en el rumen, se caracteriza por su alta densidad de población, amplia diversidad y complejidad de interacciones, encontrando, en este órgano, representantes de los tres dominios: *Bacteria*, *Archaea* y *Eucarya*, protozoos ciliados, hongos anaerobios y bacteriófagos.

Los microorganismos ruminales viven en estrecha relación simbiótica (mutualista) con el animal rumiante. El hospedero les ofrece un nicho ambientalmente favorable, con un suministro continuo de alimentos y remoción de productos finales, mientras que los microorganismos proveen un servicio digestivo, que proporciona grandes cantidades de energía disponible al animal hospedero (González, 2003; Citado por Sosa, 2006).
El éxito ecológico de los rumiantes se debe a los beneficios de la fermentación pregástrica. El término fermentación se refiere al metabolismo microbiano en ausencia de oxigeno que convierte a los carbohidratos en productos orgánicos como los ácidos grasos volátiles (AGV), ácido láctico y etanol. Estos productos retienen la mayor parte de la energía original en el sustrato, una consecuencia de la falta de oxígeno para su oxidación completa a dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y energía (ATP).

Se plantea que la fermentación ruminal le concede al rumiante una serie de ventajas que no poseen los animales monogástricos dentro de las cuales se encuentran:

1) Utilizar alimentos que son muy fibrosos para los no rumiantes.
2) Degradar la celulosa liberando el contenido celular, convirtiendo la celulosa en un nutriente primordial.

3) Sintetizar proteína microbiana de alto valor biológico a partir de proteína vegetal de bajo valor biológico, del nitrógeno no proteico de la dieta y del reciclaje de productos metabólicos de desecho (urea).
4) Proveer todas las vitaminas del complejo B siempre y cuando exista la concentración adecuada de cobalto para la síntesis de vitamina B_{12}.

Como es de suponer no todo son ventajas por lo que a continuación se relacionan algunas de las desventajas que puede tener la digestión ruminal:

1) El rumiante necesita pasar una buena parte del día (aprox. 8 h) rumiando y debe tener acceso al alimento a intervalos regulares.
2) El rumiante necesita mecanismos complejos para mantener su cámara de fermentación trabajando eficientemente por ejemplo:

a) Adición continua de grandes cantidades de saliva con naturaleza alcalina.
b) Movimientos de mezclado con tono marcado de los compartimentos gástricos.
c) Mecanismos para la eliminación de gases producto de la fermentación (eructo), para la regurgitación (rumia) y para la absorción de los productos finales de fermentación, así como para el paso de partículas no digeridas hacia el omaso.

3) Las rutas metabólicas deben ser capaces de utilizar los particulares productos finales de la fermentación, los AGV´s, de los cuales sólo el ácido propiónico es el único que puede convertirse en glucosa, cuyo requerimiento es elevado en etapas como final de gestación y lactación. Por lo que se considera al proceso de fermentación como ineficiente desde el punto de vista energético, ya que las bacterias gastan energía para su mantenimiento lo cual se traduce como calor lo cual se considera una pérdida de energía para el rumiante.

Desarrollo:

1.- Características generales del sistema digestivo de los rumiantes:

El sistema digestivo de los Rumiantes se encuentra formado por cuatro compartimentos los cuales son: Rumen, Retículo, Omaso y Abomaso.
El rumen, retículo y omaso son órganos que anteceden al abomaso (estómago glandular o estómago verdadero), razón por la que se denominan pre -estómagos.
Desde el punto de vista fisiológico el aparato digestivo de estos animales se encuentra dividido en dos sectores, el sector anterior donde se encuentra el retículo-rumen y el sector posterior donde encontramos el omaso y el abomaso.
A continuación se puede observar los compartimentos fundamentales del estomago de los rumiantes (figura 1).

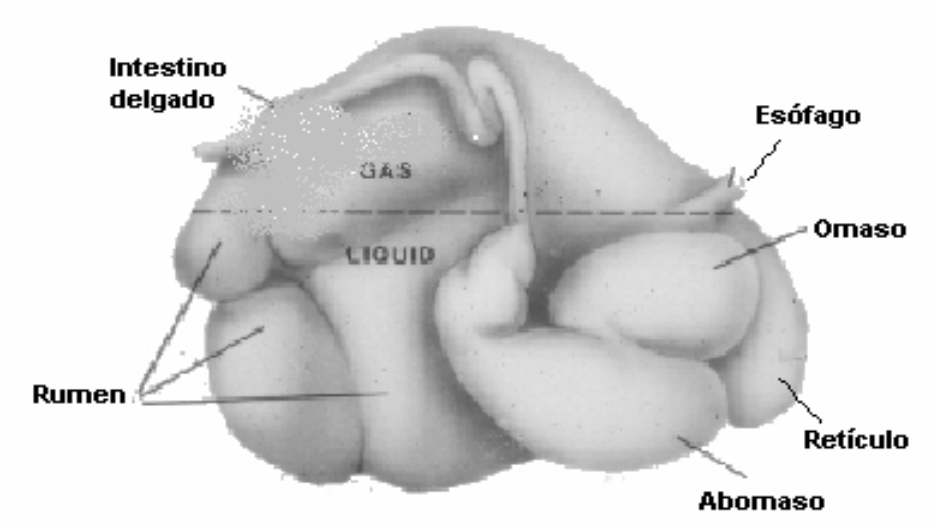


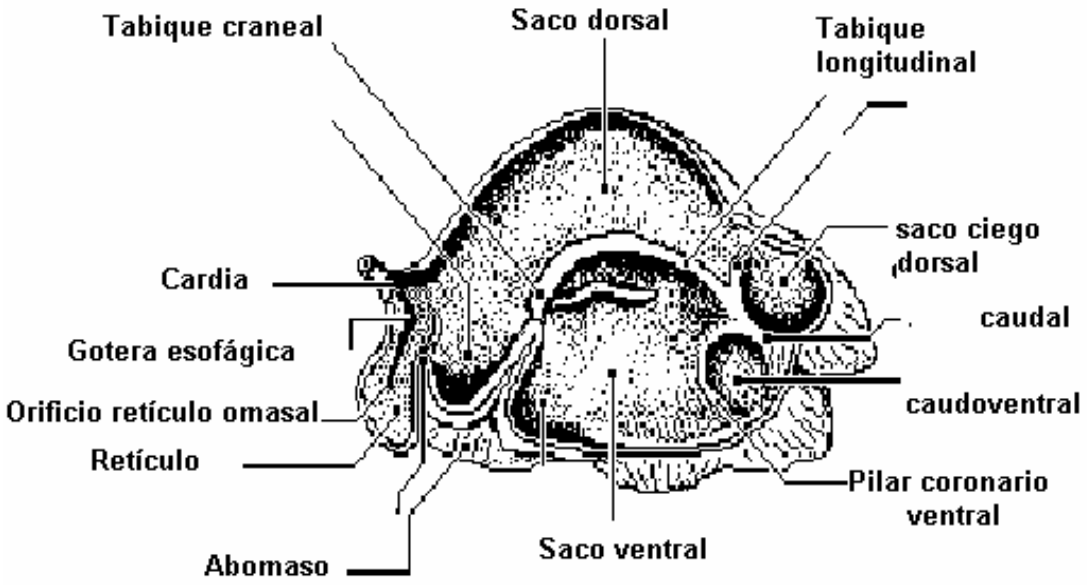
Figura 1.- *Diagrama esquemático del estómago de un rumiante.*

En estos compartimentos no hay glándulas ni se segrega mucus y la digestión ocurre gracias a las enzimas microbianas, ocurriendo la verdadera digestión en el abomaso que es el estómago glandular propiamente dicho.
A continuación se hace referencia a las características propias de cada compartimento:

1.1- ***Rumen:***

Compartimiento más voluminoso. Su volumen es aproximadamente el 75% de los cuatro departamentos. Se encuentra situado en el flanco izquierdo de la cavidad abdominal, está dividido por medio de pilares o tabiques en cuatro sacos. Los sacos mayores, el dorsal y el ventral, tienen comunicación entre sí y con el retículo, mientras que los sacos pequeños caudales no tienen comunicación con el exterior y se les denominan sacos ciegos dorsal y ventral (Fig.2).

Figura 2.- *Diagrama del retículo-rumen por su parte interna*



Según Church (1979) el rumen se desarrolla anatómicamente a partir de la porción no secretora del estómago. El aparato digestivo de los rumiantes al nacer funciona muy parecido al de los monogástricos, debido a que el rumen tiene un desarrollo muy rudimentario.
Sin embargo, su especial pauta de motilidad ya está perfectamente establecida desde el nacimiento. El desarrollo del rumen implica, por lo tanto, la implantación de la masa microbiana y la capacidad de absorción de nutrientes, siendo importante el tiempo que transcurra entre el desarrollen morfofisiológico digestivo y los procesos digestivos de fermentación ruminal dada por la relación simbiótica establecida con los microorganismos ruminales (Orskov, 1988).

Según Preston y Leng (1987) el tipo de alimento, así como la cantidad consumida, el mezclaje periódico dado por las contracciones ruminales, la salivación, la rumia y la difusión-secreción hacia el rumen, son factores que controlan el ambiente ruminal, perturbándose este, solo en condiciones anormales drásticas.

Por lo general a nivel ruminal se observa un ambiente anaeróbico con muy bajo potencial redox (250-450 MV), temperatura entre 39-41°C y una presión osmótica de 260-340 mosm. El pH se mantiene casi constante entre 6-7, gracias a la alta capacidad buferante de la saliva y a la absorción de los productos finales de la fermentación a través de la pared celular.

Veamos algunos aspectos relacionados con el mantenimiento del pH ruminal y su regulación. Los valores de pH fluctúan en el rumen, influenciado por distintos factores, como por ejemplo el tipo de alimento y tiempo de ingestión. Los valores fisiológicos normales de pH se encuentran entre 5,4 y 6, 9.

Tres puntos a tener en cuenta como factores de regulación

1. Influencia de los ácidos grasos volátiles en el aumento de la acidez. En los procesos fermentativos se producen estos AGV. Se alcanza la mayor acidez luego de aproximadamente 3 horas de la ingestión, siendo en general mayor cuando los procesos de fermentación son más intensos.
2. La cantidad de saliva secretada durante la masticación y la rumia. Dado que la saliva tiene un pH entre 8,1 y 8,3, que hace de agente neutralizante de ácidos grasos, propiedad conferida por las sales que contiene (bicarbonatos, fosfatos de sodio y potasio). La cantidad de saliva secretada fluctúa entre 100 y 180 litros.

3. La velocidad de absorción de AGV funciona como amortiguador de la acidez que estos producen. A menor grado de disociación, mayor es la velocidad. Si el pH baja, se reduce el grado de disociación y por lo tanto, al aumentar la velocidad de absorción, se logra una cierta estabilización del pH.

De gran importancia es el proceso de la rumia, dado que con este se produce un gran aporte de saliva al medio. Durante este proceso se aporta tres veces más saliva que cuando la masticación. Se debe tener en cuenta que el tiempo de rumia será afectado por el tipo de alimento y la calidad física y química.

El rumen se encuentra densamente poblado por una gran variedad de bacterias, hongos y protozoos (Hungate, 1966; Van Soest, 1994 y Jonany *et al*, 1995) (Citados por Delgado 2006) que son responsables de los procesos digestivos que tienen lugar en el órgano. Estableciéndose una relación de simbiosis entre el animal y los microorganismos ruminales.
La estrategia alimentaria de los rumiantes se basa en dicha simbiosis establecida entre los microorganismos ruminales y el animal. Mientras el rumiante aporta alimentos y las condiciones medioambientales adecuadas (temperatura, acidez, anaerobiosis, ambiente reductor, atc), las bacterias utilizan parcialmente los alimentos haciendo útiles los forrajes (de otra forma indigestibles para los mamíferos) y aportando productos de la fermentación con valor nutritivo para el rumiante (los ácidos grasos volátiles) y sus propios cuerpos microbianos. La característica más peculiar de las bacterias fibrolíticas está dada por su capacidad de digerir la fibra, produciendo acetato como producto principal de fermentación. El acetato es fundamental para la síntesis de grasa de la leche. Sin embargo, es esencial que el pH ruminal se mantenga por encima de 6.0 para garantizar las condiciones idóneas para su funcionamiento. (Calsamiglia, 1997)

Se puede decir que el rumen es una cámara de fermentación anaeróbica, en la cual la población microbiana se mantiene al ingerir y masticar alimentos con regularidad, añadiendo tampones y eliminando los ácidos producidos, arrastrando los residuos alimenticios no digeribles y los productos microbianos y manteniendo condiciones apropiadas de pH, temperatura y humedad para el crecimiento de los microorganismos. Estos dependen del rumiante para disponer de las condiciones óptimas para su crecimiento, y el rumiante depende de los productos de fermentación anaeróbica de los alimentos fibrosos que ingiere y de la actividad biosintética microbiana, para cubrir sus propias necesidades nutritivas. (Yokohama y Jonson, 1988) (Citados por Rotger, 2005).

Según Martínez, (2005) dentro de las principales funciones del Rumen y los microorganismos ruminales podemos citar:

1- Digestión de los carbohidratos de las plantas como la celulosa, hemicelulosa, almidón y azúcares a glucosa.
2- Conversión de glucosa a ácidos grasos volátiles (AGV), principalmente a acético, propiónico y butírico.
3- Digestión de la proteína de los alimentos.
4- Síntesis de proteína bacteriana.
5- Síntesis de vitaminas (hidrosolubles, principalmente vitaminas del complejo B y k)
6- Digestión de grasas.
7- Hidrogenación de grasas insaturadas.

1.2- *Retículo:*

Situado en la parte anterior de la cavidad abdominal, separado del rumen por el pliegue retículo-ruminal. Con comunicación interna por la parte superior. Se puede decir que el rumen y el retículo son

considerados un solo órgano separados por el pliegue rumino-reticular lo que posibilita el intercambio de digesta y un mayor sitio de fermentación y absorción de AGV.
El retículo rumen se encarga de:

- Preparación del alimento para la digestión química en el abomaso e intestino delgado.
- Mezcla del alimento y degradación de la celulosa por bacterias y protozoos
- Regurgitación y remasticación del alimento en la boca.
- Distribución del alimento remasticado en el rumen-retículo y paso al omaso.
- Eliminación de los gases que se acumulan por la actividad bacteriana.

Por su parte interior, el retículo – rumen (RR) tiene apariencia rugosa por la presencia de las papilas. Estas papilas son mayores en los sacos dorsal y ventral lo que incrementa la superficie de absorción. Esto constituye una forma de adaptación a las necesidades absortivas del órgano que como se dijo anteriormente, no posee capacidad secretora (Van Soest, 1982).

El RR se puede considerar como un sistema de fermentación continua, cuya capacidad requiere que todas las sustancias que entren con los alimentos o se produzcan por la fermentación salgan del órgano y la entrada y la salida deben estar balanceadas. El rumen en animales adultos puede contener hasta 100-120 Kg. de materia en digestión, las partículas de fibra permanecen en él de 20 a 48 horas debido a que la fermentación bacteriana es un proceso lento (Wattiaux *et al.,* 2000). Con alimentos fibrosos de baja calidad este tiempo suele ser aún mayor.

1.3- Canal reticular o gotera esofágica:

El rumen está conectado con el omaso, a través de un cuello corto y estrecho que termina en el llamado orificio retículo omasal (ORO) que se extiende desde el cardia hasta el omaso. El ORO está formado por dos pliegues musculares que se cierran para dirigir los alimentos líquidos desde el esófago hasta el abomaso sin pasar por el rumen.
El cierre se produce por un reflejo que inicialmente se atribuyó a algunas sustancias presentes en la leche, sin embargo, en la actualidad existen evidencias de que el patrón de comportamiento, unido con la estimulación táctil de la teta que proporciona la leche, son los responsables del cierre del canal (Orskov, 1990).
Se ha demostrado que el estímulo es necesario para el cierre, ya que aunque los receptores presentes en la boca se sobrepasen por introducción del líquido directamente en el esófago, si el animal se estimula enseñándole el biberón o la vasija donde se alimenta normalmente, el fluido entra al abomaso. Por el contrario, si el animal lactante se fuerza para que ingiera la leche, sin que haya un estímulo previo, ésta entra al rumen y se produce fermentación láctica, lo que conduce a acidosis y parcial destrucción de la proteína (Orskov, 1990).
El cierre del canal reticular no es perfecto, lo que posibilita que una pequeña parte de los alimentos que ingiere el ternero vaya cayendo directamente en el rumen. Esto sirve de inóculo inicial para que se establezca la microflora en el órgano.
El canal reticular es más funcional en los animales lactantes que lo utilizan para pasar la leche directamente desde el esófago hacia el abomaso. En el rumiante adulto sólo funciona si se ha mantenido el estímulo para el cierre, suministrando los nutrientes con teteras o algunas soluciones minerales de cobre y de sodio que provocan un efecto similar.

1.4- El Omaso:

Situado en la parte derecha de la cavidad abdominal. Conectado con el retículo (orificio retículo-omasal) y con el abomaso.
El omaso tiene forma elipsoidal, presenta papilas longitudinales y anchas en forma de hojas o láminas que emergen de las paredes del órgano y se disponen en orden de tamaño en varias hileras. La función del omaso aún no se comprende totalmente, pero parece ser que atrapa las partículas pequeñas de la

ingesta, comprime los alimentos y extrae líquido. Además en este órgano se absorbe agua y otras especies moleculares pequeñas (NH_3, AGV, electrolitos inorgánicos, etc).
El omaso, contrarresta, por absorción, el exceso de carga ácida, osmótica, acuosa o amoniacal de dicho contenido con lo que protege al abomaso y al duodeno de la llegada de un quimo anormal y asegura una buena digestión (Asocras, 2000).

1.5- El abomaso:
El abomaso es un saco alargado que se encuentra en su mayor parte en el suelo del abdomen. Constituye la región glandular del estómago de los rumiantes y es equivalente al estómago de los monogástricos. En esta región ocurre la verdadera digestión ante la presencia de ácido clorhídrico y enzimas.

1.6- Intestinos:
El abomaso y el intestino delgado (duodeno, yeyuno e íleon) parecen tener funciones similares en los rumiantes y en los monogástricos. Es en estos órganos donde los residuos no fermentados de los alimentos y los microorganismos ruminales se someten a la digestión enzimática y sus productos se absorben para ser utilizados en los diferentes procesos metabólicos en dependencia del fin productivo del animal. (Preston y Leng, 1987; Forbes y Frences, 1993).
Es muy importante saber que la velocidad de digestión de los alimentos en los rumiantes es más lenta que en los monogástricos, pero también, los sustratos (alimentos) son modificados con mayor intensidad).

El intestino grueso (ciego y colon) se une al íleon, a través del orificio ileocecal. El ciego y el colon son áreas de colonización microbiana y fermentación de aquellas fracciones alimentarias que sobrepasan la fermentación ruminal y la digestión en el intestino delgado. Las bacterias presentes en el intestino grueso difieren muy poco de las del rumen. La producción de AGV que se absorbe desde el intestino grueso representa una fracción muy variable, de 4 a 26 % de la energía total digerida.

2.- Digestión Ruminal.

Podemos decir que la digestión microbiana que tiene lugar en el rumen es la piedra angular de la fisiología digestiva del rumiante.
En el rumen se modifica el alimento consumido, se degradan la celulosa y los carbohidratos solubles, se altera la secuencia de aminoácidos de las proteínas y se sintetizan algunas vitaminas del Complejo B.
El hecho más sobresaliente de la digestión en los rumiantes es su capacidad para utilizar todas las formas de celulosa. La celulolisis falta en el reino animal, ningún mamífero segrega celulasa, que es la enzima que degrada la celulosa, pero las bacterias y los hongos celulolíticos, que conviven simbióticamente en el rumen, producen un complejo enzimático β-1-4 glucosidasas capaz de solubilizar entre 70 y 90 % de la celulosa.
Los productos universales de la fermentación microbiana ruminal son los ácidos grasos volátiles (AGV), principalmente los ácidos acético, propiónico y butírico, que constituyen más del 90 % de los ácidos que se producen en el rumen, el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). En estos procesos se pierde energía en forma de calor y de metano.

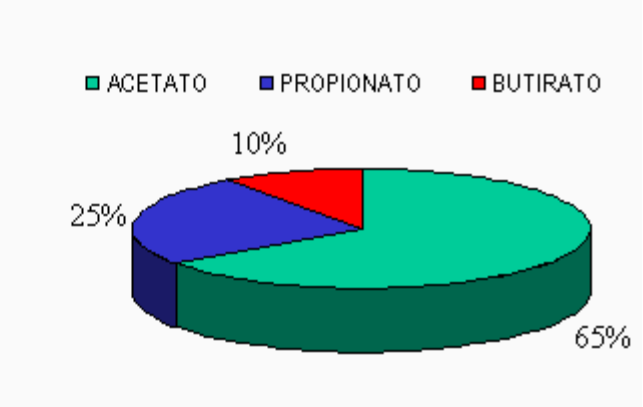
2.1- Digestión microbiana de los hidratos de carbono:

Como bien es conocido los hidratos de carbono son la principal fuente de energía, diferenciándose dentro de estas distintas estructuras las cuales se relacionan a continuación.

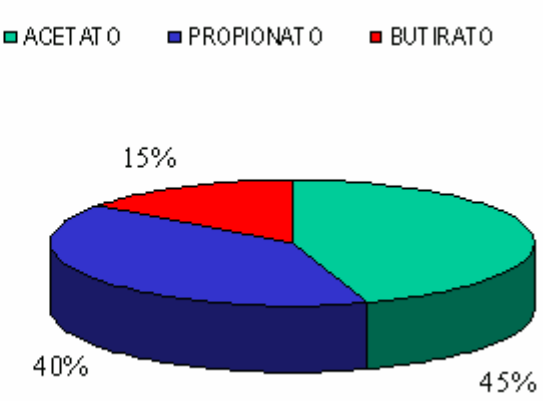
- Monosacáridos (Pentosas: ribosa, arabinosa, xilosa; Hexosas: glucosa, manosa, galactosa, fructosa)
- Disacáridos (sacarosa, lactosa, maltosa)
- Trisacáridos (rafinosa)

- Polisacáridos (Hexosanas, almidón, glucógeno, celulosa, inulina, pentosanas)
- Heteropolisacáridos (hemicelulosa, pectina, lignina)

A partir de los hidratos de carbono se obtienen los compuestos de mayor importancia energética para los rumiantes, los AGV. Estas sustancias se absorben desde el RR y producen entre el 50-80 % de la energía metabolizable (EM) que ingiere el animal. Los carbohidratos a su vez, son los precursores más importantes en la síntesis de grasa y azúcar (lactosa) para la leche.
Las vías metabólicas de formación de los AGV y sus implicaciones para la producción de energía en forma de ATP, aparecen bien descritas en la literatura. Los carbohidratos utilizan vías diferentes hasta convertirse en piruvato que es el intermediario universal en la síntesis de los AGV. La óxido reducción de piruvato seguida por una descarboxilación conduce a la formación de acetil-CoA que a su vez, se transforma en acetato. El butirato se forma por condensación de dos moléculas de acetil-CoA y el propionato tiene dos vías de formación; a partir del succinato y del ácido láctico
En general los azúcares y los carbohidratos solubles se degradan rápidamente, mientras que los polisacáridos estructurales son atacados con rapidez variable. Los materiales de más difícil degradación son la celulosa y la hemicelulosa, cuya estrecha asociación con la lignina los hace menos asequible a la acción microbiana.
Según Sodio, (2004) la fermentación es el último paso en la digestión de los carbohidratos, la cual provee de ATP a los microorganismos, este paso también es esencial para producir AGV para el metabolismo energético de los animales
Los mamíferos poseen enzimas en su tracto digestivo capaces de convertir el almidón y los azúcares solubles en glucosa que desde el punto de vista energético es superior a los AGV. Sin embargo, estos carbohidratos son fermentados en el rumen lo que constituye una pérdida energética inevitable para el rumiante.
La concentración total de AGV en el rumen y las cantidades de cada uno de ellos dependen de la dieta. En dependencia de la fuente de carbohidratos variará la cantidad y la relación de AGV producidos.
A continuación se muestra como los cambios en la dieta pueden modificar el patrón de fermentación.
Cuando la dieta del animal está basada en forrajes, la proporción molar en que se encuentran los AGV es:



Mientras que si la dieta es alta en granos o concentrados la proporción será de:



Como se puede observar con alimentos fibrosos el patrón de fermentación es predominantemente acético, con una proporción aproximada de de 65 % de acético, 25 % de propiónico y 10 % de butírico.

Raciones muy ricas en almidones (concentrados), incrementan la proporción de propiónico hasta alrededor de 45 %, pero provocan un efecto negativo en la salud de las vacas, porque tiende a producirse hígado graso, distocia y cetosis ruminal. Por el contrario, cuando predomina en la dieta un forraje de muy baja calidad, se limita la energía y la producción de leche. (Wattiaux y Armentano, 2000). A continuación mostramos una tabla donde se puede apreciar las proporciones molares de AGV en diferentes dietas.

Tabla 1.- Proporciones molares de AGV en diferentes dietas.

	AGV, % MOLAR			
Dietas	Acético	Propiónico	Butírico	Otros
Caña de azúcar	62.5	23.9	13.5	-
Mil/urea	31.0	19.0	41.0	9
Granos de cereales	39.0	40.0	21.0	-
Heno de alfalfa	74.0	18.5	7.5	-
Pasto	66.0	18.5	11.5	-
Saccharina pienso	64.0	19.0	11.0	-

2.2- Digestión de los compuestos nitrogenados:

El estudio de las particularidades del rumiante en la digestión de los compuestos nitrogenados reúne aspectos de gran interés económico. La producción de proteína microbiana, a partir de los compuestos químicos no proteicos, junto a la digestión de la fibra, ofrecen una forma de producir alimentos para el hombre a partir del material no utilizable directamente para el consumo humano. De este modo el rumiante se sitúa en el papel central del uso efectivo de los recursos nutritivos en el mundo (Ruiz y Ayala, 1987).

Las proteínas proporcionan los aminoácidos requeridos para el mantenimiento de las funciones vitales como reproducción, crecimiento y lactancia. Los animales no-rumiantes necesitan aminoácidos pre-formados en su dieta, pero los rumiantes pueden utilizar otras fuentes de nitrógeno porque los

microorganismos que habitan el rumen tienen la habilidad especial de sintetizar aminoácidos y de formar proteína a partir nitrógeno no-proteico.

Los compuestos nitrogenados de origen dietario que llegan al rumen incluyen varios tipos de proteína que pueden diferir marcadamente en el contenido de aminoácidos y solubilidad entre los que se incluyen:
a) Proteínas moleculares que contienen bases púricas y pirimidínicas.
b) El nitrógeno no proteico (NNP) en forma de aminoácidos, péptidos, amidas aminas, sales de amonio, nitratos, nitritos y la urea.
c) Las proteínas vegetales que hacen el mayor aporte de N y están constituidas por las fracciones proteicas de las hojas, NNP, además de pequeñas fracciones de enzimas de los cloroplastos, membranas y proteínas nucleares y mitocondriales.
Al rumen también llega N de origen endógeno que incluye fundamentalmente las decamaciones de los tejidos epiteliales, la urea que aporta la saliva y la que difunde, a través de la pared ruminal.
Los rumiantes poseen además, un mecanismo para ahorrar nitrógeno. Cuando el contenido de nitrógeno en la dieta es bajo, la urea, un producto final del metabolismo de las proteínas en el cuerpo, puede ser reciclada al rumen en grandes cantidades y los microorganismos la utilizan para sintetizar proteína. Se puede añadir que en los no-rumiantes, la urea siempre se pierde en la orina.
Considerando estas adaptaciones del metabolismo de nitrógeno, es posible alimentar vacas con fuentes de nitrógeno no proteico y obtener una producción de 580 gr. de proteína en la leche y 4000 kg. de leche por lactancia (Wattiaux y Armentano, 2000).
En el rumen, cierta cantidad de proteína dietaria puede escapar a la digestión ruminal y pasar al intestino sin modificarse en el rumen, a ésta se le denomina proteína sobrepasante (proteína by-pass). La proteína microbiana representada por los cuerpos celulares de los microorganismos, pasa con las proteínas de la ración que no fueron modificadas por la microflora ruminal a través del omaso, abomaso, hasta el intestino en donde son digeridas por acción de las enzimas pepsina, tripsina, quimiotripsina, carboxipeptidasa y aminopeptidasa en forma similar a la digestión proteica en los monogástricos.
De los nutrientes nitrogenados que consumen los rumiantes, entre 25 a 50 % llega al ciego, donde hay actividad de enzimas proteolíticas, ureolíticas y desaminasas, lo cual explicaría la elevada concentración de amoníaco en el contenido cecal. El amoníaco absorbido desde el ciego es convertido a urea en el hígado y puede ser reciclado hacia el rumen vía saliva.

2.2.1- Transformación de proteína en el rumen:

La microflora ruminal altamente proteolítica, representa entre 30-50 % de la población bacteriana. Las bacterias degradan la mayor parte de las proteínas en péptidos y aminoácidos, una alta proporción de los aminoácidos son desaminados hasta NH_3 y cadenas carbonadas. Estas últimas se utilizan para la síntesis de ácidos grasos ramificados.
La velocidad y magnitud de la degradación proteica en el rumen varía entre proteínas de diferentes fuentes y también depende del nivel de la actividad proteolítica (que es altamente variable) del tiempo de estancia de la proteína en el rumen, del pH y las especies microbianas presentes, influyendo directamente el tipo de dieta en la actividad proteolítica.

2.3- Digestión ruminal de los lípidos:

Los lípidos de los pastos son la fuente principal de grasa para los rumiantes. Usualmente la dieta consumida por los rumiantes contiene sólo 4-6% de lípidos, en base seca. Sin embargo, ellos son parte importante de la ración de una vaca lechera porque contribuyen directamente a casi 50% de la grasa en la leche y son la fuente más concentrada de energía en los alimentos (Wattiaux, 2000).

El metabolismo de los lípidos se diferencia enormemente en los monogástricos y los poligástricos. Esta diferencia radica, principalmente, en que en los rumiantes la flora microbiana ruminal modifica las sustancias lipídicas, dando lugar a que las grasas que se depositan en los tejidos tengan una composición

relativamente constante y diferente de la que aportan los alimentos, mientras que en los monogástricos las grasas de reservas son muy similares a las alimentarias.

La adición de grasa a la dieta de los rumiantes influye en el comportamiento de la fermentación ruminal y en la secreción de la grasa láctea. Un exceso en la ración resulta negativo en la digestibilidad de la fibra. Actualmente las grasas se saponifican para formar jabones de calcio u otros, lo que permite su mayor utilización.

2.4- Absorción ruminal:

Como se ha venido reflejando los AGV son de suma importancia ya que representan más del 70% del suministro de energía al rumiante. Virtualmente todo ácido acético, propiónico y el ácido butírico son absorbidos por el epitelio del rumen y transportados vía porta al hígado. La absorción de AGV no sólo es importante para mantener su distribución en las células animales, sino para prevenir cantidades excesivas que puedan alterar el pH ruminal. (Nava, 2001).

El epitelio estratificado del rumen generalmente no se caracteriza por una eficaz absorción. No obstante es capaz de absorber eficientemente AGV, ácido láctico, electrólitos y agua. La superficie del epitelio es muy extendida debido a la formación de papilas bien vascularizadas.
De los AGV, el 85 % se absorbe en el rumen, el 10 % en el omaso y abomaso, y un 5 % puede pasar al intestino. El ácido butírico tiene mayor metabolismo en el epitelio, convirtiéndose en cuerpos cetónicos (ß-hidroxibutírico); en bovinos, se metaboliza 50 % del butírico absorbido, mientras que en caprinos es 80 a 85 % y en ovinos 90 %. En el epitelio ruminal, 50 a 70 % del ácido propiónico se metaboliza a ácido pirúvico y láctico, aunque posiblemente esté limitado por la actividad de la propionil-CoA sintetasa; el ácido láctico que aparece en la sangre deriva de la glucólisis en el epitelio. Durante la absorción ruminal, alrededor de 30 % del ácido acético se metaboliza y la limitación principal es la baja actividad de la acetil-CoA sintetasa del epitelio ruminal. Entonces, la absorción de los AGV puede explicarse en términos de difusión; este proceso es modificado por el metabolismo epitelial de los ácidos, el pH ruminal, el gradiente de concentración entre el contenido ruminal, el epitelio y la sangre, así como la asimetría en la permeabilidad de las membranas.

En rumiantes alimentados con dietas concentradas, la liberación de ácido láctico aumenta a medida que se incrementa el grano en la dieta; este compuesto también se absorbe a través del epitelio ruminal. En ovinos, 3.5 h después de una infusión de ácido láctico directamente al rumen, había desaparecido 95 %: 57 % por absorción, 34 % por metabolismo y utilización por microorganismos, y 9 % por pasaje al tubo digestivo posterior. En condiciones anormales, como una acidosis láctica, la disminución del pH y el aumento en la concentración de ácido láctico, causa un incremento significativo en la cantidad absorbida. (González, 2002).

Los AGV absorbidos tienen diferentes destinos metabólicos. (Nava, 2001)

- El ácido acético se oxida en los diferentes tejidos para generar ATP. También funciona como la principal fuente acetil-CoA para la síntesis de lípidos corporales de reserva y de la grasa de la leche.
- El “ácido propiónico” es el único de los AGVs que el hígado puede transformar en glucosa, en la vía de la gluconeogénesis. De esta manera, las moléculas de glucosa sintetizadas en este proceso serán exportadas hacia los tejidos corporales (principalmente el nervioso, el cardíaco y el sanguíneo), quienes serán los encargados de utilizarla como fuente de energía para la síntesis de ATP. Además, la glucosa es utilizada para la formación de glucógeno (reserva de energía) en los músculos y para la síntesis de la lactosa de la leche.

- El ácido butírico absorbido en forma de ácido ß-hidroxibutírico, es oxidado en muchos tejidos para la producción de energía.

El agua atraviesa libremente el epitelio ruminal y, al comienzo de la digestión, grandes volúmenes de agua entran al rumen a través del epitelio debido al incremento de la presión osmótica del contenido ruminal. La absorción de los productos de la fermentación y el paso del quimo alimenticio hacia el tubo digestivo posterior, reduce la presión osmótica del líquido ruminal y se observa un flujo de agua desde el rumen hacia el epitelio. Sin embargo, a pesar de que el flujo de agua desde y hacia el rumen es muy grande durante el día, el flujo neto diario es cercano a cero
En sentido general el metabolismo del rumiante se encuentra enfocado a aprovechar los productos de la fermentación microbiana como los Ácidos Grasos Volátiles, sin embargo, no todos los productos de la fermentación microbiana son útiles para el rumiante, también los hay no útiles como el metano o incluso nocivos como el amoniaco y los nitratos. (Owens y Goetsch, 1986). Así como algunos suelen ser contaminantes del para el medio ambiente como es el caso del ya mencionado Metano.

2.5- Proceso de Metanogénesis:

El metano se forma en el rumen por la acción de las bacterias metanogénicas que reducen el CO_2 de las cuales hablaremos en acápites posteriores. Se considera el ácido fórmico como la fuente más probable de hidrógeno para que ocurra esta reacción. El metano constituye una pérdida energética considerable, ya que representa entre 7 y 8 % de la energía bruta consumida. Las pérdidas que originan la producción de metano pueden fluctuar entre 2.5-33 millones de t de alimento anuales (Ruiz y Dearriba, 1987).
El metano constituye además un gas contaminante del ambiente. Se ha estimado que la población de rumiantes del mundo produce 77, 000 000 t de metano anualmente, lo cual constituye alrededor del 15 % de la emisión total del gas atmosférico (Mc Allister et al. 1996, Asanuma, 1999) (Citados por Delgado, 2006), por lo que disminuir su producción, a través de una mejora en la eficiencia de la fermentación ruminal, debe ser objetivo principal en la ganadería tropical.

3.- Microorganismos ruminales:

Los microorganismos ruminales han habitado en él durante poco más de 70 millones de años y se ha formado una relación de ecología (Oekologie, del griego oikos que significa “casa” y logos “ciencia”) ruminal, donde el rumen es un ecosistema microbiano con complejas interrelaciones.

El sistema microbiano ruminal es un activo proceso regulado mediante complejos mecanismos bioquímicos. En el rumen existe una fase gaseosa donde podemos encontrar metano (CH_4) y CO_2, y otra acuosa que tiene dos estratos: estrato ventral (90 % agua y 10 % MS), donde están las partículas de alimento de mayor densidad y de forraje con más de 12 h de digestión; estrato superior (80 % agua y 20 % MS) conformado por un manto de forraje de baja densidad. Por tanto, los estratos difieren en composición y actividad microbiana; en la fase acuosa los microorganismos son anaerobios estrictos, con una menor cantidad de anaerobios facultativos. Las bacterias forman la mayor parte de esos microorganismos, hay un máximo de 40 % de protozoarios y menos de 8 % de hongos.
Cheng y Costerton (1980) postularon que los microorganismos del rumen pueden ser clasificados en tres grupos: (I) los microorganismos que se adhieren a la pared del rumen, (II) los que viven libremente y (III) los que están adheridos a las partículas del alimento. Este último grupo representa 75 % del total de microorganismos ruminales y desde el punto de vista ecológico son los que presentan las mayores ventajas, ya que los otros pueden ser removidos del rumen más rápidamente por el flujo de la digesta.
Un factor importante para alcanzar una actividad microbiana óptima es que los microorganismos dispongan de los sustratos necesarios para su mantenimiento y crecimiento. En ausencia de energía fermentable y algunos otros nutrientes exógenos, el 60 % de las bacterias ruminales podrían morir en un

lapso de tiempo de 2 horas y alrededor del 30 % o más podrían lisiarse debido a la inanición (Hespell, 1979). Por tanto, es necesario garantizar energía y nitrógeno suficiente y además minerales, vitaminas, péptidos y aminoácidos, si se quiere obtener una velocidad de digestión de la fibra y una síntesis de proteína óptima.
Como se puede observar el ecosistema ruminal es enormemente complejo, responde a cambios dietarios y la optimización de la fermentación ruminal dependerá en gran medida del entendimiento que se logre tener de los mecanismos reguladores de los procesos que tienen lugar en el rumen.

3.1- Bacterias:
Cada mililitro de contenido ruminal alberga alrededor de 10 000 a 50 000 millones de bacterias, siendo estos los microorganismos más abundantes. Las bacterias se encuentran en una gran variedad de géneros y especies por lo menos 28 especies funcionalmente importantes, las cuales se agrupan de acuerdo a su actividad.
La mayoría de las bacterias son anaerobias estrictas, que no pueden sobrevivir en presencia de oxígeno, sin embargo también se encuentran presentes organismos facultativos.
Las bacterias en el rumen contribuyen al desarrollo de las funciones ruminales en los terneros en etapa de prerumiantes preparando al rumen para el destete. El productor, puede estimular a las bacterias ruminales de las siguientes maneras:
• Proveer agua fresca y limpia. Las bacterias viven en un ambiente acuoso y una fuente de agua fresca es importante para su crecimiento. Se recomienda suministrar agua fresca diariamente desde el nacimiento.
• Al brindar al los terneros un iniciador fresco y limpio las bacterias del rumen van a fermentar los carbohidratos y algunas de las proteínas en el iniciador hasta convertirlas en ácidos grasos volátiles, propiciando estos ácidos el desarrollo del rumen.
• Cuando los terneros son alimentados únicamente con iniciador, tienden a comer grandes cantidades en un período de tiempo corto. Esto puede tener efectos profundos en el pH del rumen e influenciar las poblaciones de bacterias en este. Por lo que, cuando sea posible, se debe permitir a los terneros preruminantes tener acceso al iniciador hasta un máximo de alrededor de 3.5 kg (7 lbs) por día.

Las bacterias del rumen se adaptarán a los cambios en el medio ambiente ruminal rápidamente. Usualmente, alrededor de las 2 semanas después de introducir alimentos hacia el rumen, las bacterias en el rumen del ternero van a parecerse a las que se encuentran en animales adultos. (Quigley, 1997)

Según González, 2002 la mayoría de las bacterias que podemos encontrar en el rumen son anaerobias estrictas, Gram negativas donde se observan bacilos, cocos, cocobacilos, espiroquetas y esporoformes, siendo las principales responsables de fermentación ruminal. Algunos de los principales grupos de bacterias, de acuerdo con el substrato utilizado, son los siguientes:

Celulolíticas: *Bacteroides ruminicola, Butyrivibrio fibrisolvens, Fibrobacter succinogenes, Ruminococcus flavefaciens, R. albus*.
Hemicelulolíticas: *Butyrivibrio fibrisolvens, Fibrobacter succinogenes, Ruminococcus flavefaciens, R. albus*.
Amilolticas: *Bacteroides amylophilus, B. ruminicola, Streptococcus bovis, Succinomonas amilolítica*.
Proteolíticas: *Bacteroides amylophilus, B. ruminicola, Butyrivibrio fibrisolvens, Streptococcus bovis* .
Pectina: *B. fibrisolvens* y *Lachnospira multiparus* y varios protozoarios.
A continuación en la tabla 2 se muestran algunas de las características generales de las bacterias que habitan en el rumen.

Tabla 2.- Características de algunas bacterias del rumen.

Organismo	Morfología	Movilidad	Productos de fermentación	DNA (mol %C+G)	Sustrato
Fibrobacter succinogenes *	Bacilo	-	Succinato, acetato, formiato	45-51	Celulosa
Butyrivibrio fibrisolvens *	Bacilo curvado	+	Acetato, formiato, lactato, butirato, H2 y CO2	41	Celulosa
Ruminococcus albus *	Coco	-	Acetato, formiato, H2 y CO2	43-46	Celulosa
Clostridium lochheadii	Bacilo (espora)	+	Acetato, formiato, butirato H2 y CO2	-	Celulosa
Ruminococcus Flavefaciens	Coco		Acetato, succinato y H2	39-44	Celulosa
Clostridium polysaccharolyti-cum	Bacilo (espora)		Acetato, formiato, butirato y H2	-	Celulosa y almidón
Bacteroides ruminicola	Bacilo	-	Formiato, acetato y succinato	40-42	Almidón
Ruminobacter amylopHilus	Bacilo	-	Formiato, acetato y succinato	49	Almidón
Selenomonas ruminantium	Bacilo curvado	+	Acetato, propionato y lactato	49	Almidón
Succinomas amylolytica	Ovalado	+	Acetato, propionato y succinato	-	Almidón
Streptococcus Boris	Coco	-	Lactato	37-39	Almidón
Selenomonas lactilytica	Bacilo curvado	+	Acetato y succinato	50	Lactato
MegaspHaera elsdenii	Coco	-	Acetato, propionato, butirato,	54	Lactato

			valerato, coproato, H2 y CO2		
Viellonella párvula	Coco		Acetato, propionato y H2	38-41	Lactato
Lachnospira multiparus	Bacilo curvado	+	Acetato, formiato, lactato, H2 y CO2	-	Pectina
Anaerovibrio lipolytica	Bacilo		Acetato, propionato y succinato	-	Lipolitico
Eubacterium ruminantium	Bacilo		Formiato, butirato, lactosa y CO2	-	Xilano
Lactobacillus ruminis	Bacilo		Lactosa	44-47	Azucares
Lactobacillus vitulinus	Bacilo		Lactosa	34-37	Azucares
Methanobrevi-bacter ruminantium	Bacilo	-	CH4 (de H2 + CO2 o formiato)	31	Metanógenos
Methanomicro-bium mobile	Bacilo	+	CH4 (de H2 + CO2 o formiato)	49	Metanógenos
Eubacterium oxidoreducens	Bacilo		Lactosa y H2	36	Aromáticos

Como bien se conoce la mayor parte de los nutrientes energéticos que consumen los rumiantes se encuentran en la celulosa, hemicelulosa, y pectina de la pared celular así como en el almidón del contenido celular, de aquí la importancia de estos microorganismos en la alimentación de estos animales. Además, *B. amilophylus*, *Selenomonas ruminantium*, y *Streptococcus bovis*, al igual que algunas cepas de *B. succinogenes*, sintetizan amilasas (para fermentar almidón), mientras que *Megasphaera elsdenii* utiliza azúcares solubles.

También algunas bacterias degradan componentes tóxicos de la dieta como los aminoácidos mimosina y sus derivados, componentes del forraje de Leucaena, fenoles vegetales como la cumarina (1,2 benzopirona), la canavanina, análoga a la arginina, componente de la leguminosa Canavalia ensiformis, que inhibe algunas bacterias del rumen, pero es hidrolizada por otras.
A pesar del papel de las poblaciones protozoaria y fúngica del rumen en la digestión de la pared celular vegetal, parece claro que son las bacterias los microorganismos más activamente implicados en este proceso, tanto cualitativamente, por su alta actividad enzimática, como a nivel cuantitativo, por la magnitud de su repercusión debida a su elevada concentración en el rumen.

3.2- Bacterias metanogénicas:

Las bacterias metanogénicas forman parte del dominio de las *Arqueobacterias*, que incluye tres tipos de bacterias: metanogénicas, las que producen metano; halófilas extremas, las que viven en medios salinos extremos, y termoacidófilas, las que subsisten en ambientes calientes y ácidos. De los tres tipos las que predominan son las metanogénicas y han sido estudiadas por un gran número de autores (Galindo, 2006).

Los metanógenos son quizás los organismos anaeróbicos más estrictos, requiriendo no solo condiciones libres de oxígeno, necesitan también un potencial redox menor que –330mM. La mayoría tiene tiempos de duplicación que va desde varias horas a varios días. Estos factores imposibilitaron el estudio de metanógenos en cultivos puros hasta mediados de la década del 70, cuando el desarrollo de técnicas anaeróbicas perfeccionadas y cámaras de anaerobiosis seguras, simplificaron el crecimiento, aislamiento y manipulación de las bacterias metanogénicas. Otro impedimento para su estudio fue su débil crecimiento. El estudio de su nutrición, especialmente sus altos requerimiento de níquel, permitió el crecimiento suficiente para realizar estudios bioquímicos que demostraron vías metabólicas completamente nuevas (Galindo *et al*, 2006).

Estas bacterias poseen las características bioquímicas y genéticas propias de las *Archaebacterias*... Por ejemplo:

- No poseen paredes celulares con peptidoglicanos
- Poseen lípidos de membrana diferentes tanto de las *Eubacterias* como de los eucariontes (incluyendo enlaces éter en lugar de enlaces éster).
- Presentan secuencias únicas en ARNr 16S

Los metanógenos poseen coenzimas que son comunes en otras bacterias, incluyendo vitamina B_{12}, sin embargo, un aspecto especial de estos microorganismos es la presencia en ellos de un grupo de coenzimas que son únicas o de limitada distribución (Stewart y Bryant 1988). El centro del proceso de metanogénesis es la coenzima M, un transportador de grupos metilo, único en metanógenos, que es el precursor inmediato de metano. La coenzima F_{420}, sirve en *Methanobrevibacter ruminantium* y otros metanógenos, como un transportador de electrones, que funciona en lugar de la ferredoxina. Además de actuar como cofactor de la hidrogenasa, es cofactor de la formiato deshidrogenasa y NADP reductasa, por esto el hidrógeno y el formiato son fuentes equivalentes de electrones para estas bacterias. Inicialmente la CoF_{420} fue descubierta en metanógenos, posteriormente se encontró en algunos actinomicetos y nocardioformas. En *Methanosarcina barkeri*, la coenzima F_{420}, está presente en cantidades comparativamente pequeñas, y la ferredoxina sirve como transportador de electrones. Otros cofactores inusuales son una nueva pteridina, metanopterina, que funciona como un transportador de grupos C_1; y un nuevo cofactor Ni-tetrapirrol, F_{430} que es un grupo prostético de la metil CoM reductasa. (Galindo *et al*, 2006)
A pesar de compartir éstas y otras características comunes, las bacterias metanogénicas muestran diversidad en cuanto a sus características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas. En ellas están representadas todas las formas morfológicas básicas como cocos, bacilos y espirilos, tanto en formas individuales o agrupadas como el caso de las sarcinas. La composición de bases del ADN (% GC) es otra característica que varía ampliamente. Los lípidos de membrana también son diversos en estructura y composición. La pared celular es otra estructura que difiere en las diferentes especies y se clasifica en tres clases (Pseudomureica, proteica o glicoproteica) de acuerdo al principal componente de esta.
Los requerimientos nutricionales de los metanógenos son simples y la mayoría de las especies pueden vivir quimiolitotróficamente en medios con sales minerales que contengan CO_2 como fuente de carbono y H_2 como fuente de energía. El amonio es la principal fuente de nitrógeno para estas bacterias, mientras

que el azufre es suministrado por sulfito o cisteína. El crecimiento de especies autótrofas se estimula por la adición de compuestos orgánicos como acetato, cisteína, vitaminas del complejo B, líquido de rumen o extracto de levadura. Las bacterias metanogénicas requieren además, sodio, níquel, hierro, cobalto, molibdemo y otros elementos traza. Las condiciones redox se obtienen por la adición de sulfitos, cisteína o una combinación de ambos. Estos microorganismos se encuentran a pH moderados, con un óptimo entre 6 y 8. El rango de temperatura para este grupo es amplio, con un óptimo de 35 a 40°C para las especies mesófilas y 60°C para las termófilas. Actualmente estas bacterias se mantienen, en condiciones adecuadas, en varios laboratorios del mundo y se utilizan en las investigaciones sobre sus procesos metabólicos.
La clasificación de las bacterias metanogénicas se basa en la estructura del ARNr 16S. Aunque en los diferentes hábitats anaeróbios, se han identificado alrededor de 70 especies de microorganismos metanogénicos pertenecientes a 21 géneros, solo 7 especies han sido aisladas del rumen (Tajima *et al*. 2001).

Las bacterias metanogénicas encontradas en el rumen son las siguientes: *Methanobacterium formicicum bryantii; Methanobrevibacter ruminantium smithii; Methanomicrobium mobile; Methanosarcina barkeri y Methanoculleus olentangyi*
Han sido encontrado grupos de bacterias metanogénicas sobre la superficie del protozoario entodiniomorfido, estando controlada su actividad probablemente por la concentración de hidrógeno en el líquido ruminal.

La densidad de methanogens sobre la superficie de los protozoarios es reducida por un suplemento de hidrógeno exógeno, y es incrementada por un suplemento de nitrógeno. Esto sugiere que methanogens se adhiere a los protozoarios para usar el hidrógeno ya que la acumulación de este puede afectar negativamente la actividad metabólica de los protozoarios.

3.3- Protozoos:

Los protozoarios se conocen desde 1843, el contacto con otros animales parece ser la principal vía de inoculación, siendo esta la única para el establecimiento de los protozoos. Las bacterias pueden inocularse en el rumen mediante el alimento, el medio o incluso los *Lactobacillus* se inoculan por reflujo de contenido lácteo del abomaso (Roy, 1980) (Citado por Rotger 2005).
La población de protozoarios en el rumen es menor a la de las bacterias, encontrándose en concentraciones de 1 millón por ml de contenido ruminal, aunque su número es menor en comparación con las bacterias, estos microorganismos tienen un mayor volumen individual, dando lugar a una masa celular de protozoarios semejante a la masa de las bacterias.

Figura 3.- Protozoario ciliado en medio de pequeñas bacterias.

En el rumen podemos encontrar protozoos ciliados, que poseen cilios, y flagelados, que tienen flagelo. Los ciliados presentan mayor concentración y actividad pertenecientes a dos ordenes fundamentales como se relacionan a continuación.

1) Orden *Trichostomatida*, Familia *Isotrichidae*, Géneros *Isotricha*, *Dasytricha*, *Oligoisotricha*, y predominan cuando la dieta es alta en almidón (grano).
2) Orden *Entodinomorphida* (cilios cerca del peristomo u orificio bucal; ingieren bacterias principalmente), Familia *Ophryoscolecidae*.

Los protozoarios flagelados utilizan azúcares simples y bacterias como substratos: *Monocercomonas ruminantium, M. bovis, M. caprae, Trichomonas ruminantium, Tetratrichomonas ruminantium.*
El efecto de los protozoos sobre la digestión de la fibra vegetal depende del papel y de la importancia relativa de los distintos géneros y especies en el ecosistema ruminal (Jouany *et al*., 1994 y Williams *et al*., 1988)(Citados por Fondevila, 1998). En general, la presencia de protozoos aumenta, directa o indirectamente, la digestión ruminal de celulosa y hemicelulosas respecto a animales defaunados. Aunque las actividades enzimáticas endoglucanasa, ß-celobiosidasa y ß-glucosidasa —implicadas en la hidrólisis de celulosa— por una parte, y hemicelulasa y xilanasa, por otra, están ampliamente distribuidas entre los protozoos del rumen (Williams *et al.*, 1984).

A partir de estudios con protozoos cultivados *in vitro*, tratados con antibióticos para eliminar la posible contaminación bacteriana, se ha observado que la celulosa cristalina (avicel) es degradada en un 30% por protozoos de los géneros *Eudiplodinium* y *Polyplastron*, y en un 10% por *Epidinium* (Jouany, 1994). La capacidad de degradar celulosas sustituidas (hexaetilcelulosa, carboximetilcelulosa) es mayor para todos los géneros, siendo más limitada en *Entodinium* e *Isotricha*. Sin embargo, el crecimiento en medios que incluyen polisacáridos estructurales como única fuente de energía respecto a un medio sin substrato es muy variable, y sólo *Eudiplodinium* y *Epidinium* responden positivamente a la incorporación de una fuente de celulosa o de xilano.

Entre los *Ophryoscolecidos*, los protozoos de los géneros *Eudiplodinium, Polyplastron* y *Epidinium* son activos degradadores de xilano, utilizándolo como fuente de nutrientes, y degradan celulosas sustituidas con bajo grado de cristalinidad, aunque no son capaces de utilizar los productos de su hidrólisis. Sólo los dos primeros géneros mencionados son capaces de digerir y utilizar celulosa cristalina. Los protozoos del género *Entodinium* no son capaces de actuar frente a este tipo de substratos, mientras que los protozoos del género *Isotricha* tienen cierta actividad ß- glucanasa, pero no utilizan los productos de la hidrólisis para su crecimiento (Jouany *et al*., 1994, Williams *et al*, 1984). La capacidad de depolimerizar pectina está presente en algunas especies de protozoos, pero la posibilidad de utilizar los productos liberados como fuente de energía es mínima (Orpin, 1983) (Citado por Fondevila, 1998).

En sentido general la capacidad de los protozoos de adherirse a las partículas de pared celular es reducida, excepto en el caso de los holótricos, estimulados probablemente por quimiotactismo hacia azúcares solubles (Bauchop, 1989, Orpin, 1983) (Citados por Fondevila, 1998), aunque su actividad fibrolítica es escasa. Los *Epidinium* se adhieren a las partículas por una zona situada en su parte anterior; luego, vierten enzimas extracelulares que van rompiendo los tejidos vegetales en pequeños fragmentos que son entonces ingeridos y digeridos intracelularmente.

Según Bohatier *et al*., 1990 los grandes entodiniomorfos únicamente tienen actividad enzimática intracelular, y por ello ejercen su acción degradativa ingiriendo partículas suspendidas en el medio, que luego digieren intracelularmente.

Cunningham en 1997(Citado por Sodiy *et al*., 2004) reportó que los protozoos ingieren grandes números de bacterias y mantienen constante la cantidad de bacterias ruminales teniendo un efecto negativo sobre las bacterias amilolíticas, debido a que protozoarios como *Entodiniomorfido* pueden ingerir grandes

cantidades de gránulos de almidón, lo que disminuye la disponibilidad de almidón para las bacterias amilolíticas. La ingestión de almidón viene acompañada también por una depredación selectiva de las bacterias amilolíticas que se adhieren a los gránulos de almidón.

3.4- Hongos:

En el rumen existen también hongos anaerobios, conocidos desde 1974, en una concentración de 10^3 a 10^5 mL-1 fluido ruminal ejemplos de estos lo constituyen: *Neocallimastix frontalis, Sphaeromonas communis; Piromonas communis, Orpinomyces*.

Se plantea que la población de hongos anaerobios del rumen está directamente relacionada con el contenido en fibra de la dieta, y su proporción disminuye en dietas ricas en almidón o azúcares solubles (Grenet *et al*, 1989). Los hongos ruminales tienen capacidad enzimática de hidrolizar celulosa y xilano, aunque parece que no pectina (Fonty *et al*, 1991, Hébraud *et al*, 1988). Lógicamente, su actividad enzimática frente a estos substratos es variable dependiendo de su origen filogenético, en especial de su estructura rizoidal, pero se ha postulado que algunas especies, como *Neocallimastix frontalis, Piromyces comunis* y *Orpinomyces joyonii* son tanto o incluso más eficientes en la digestión de los polisacáridos estructurales como las especies bacterianas más activamente celulolíticas.

La acción fúngica sobre la pared celular vegetal y su contribución a la digestión ruminal de ésta, parece estar muy relacionada con su activa colonización. Se ha observado mediante microscopía electrónica que las zoosporas son atraídas por quimiotactismo (Bauchop, 1989) (Citado por Fondevila, 1998), y se adhieren rápidamente a las partículas, preferentemente en estomas y zonas de corte de los tejidos lignificados (esclerénquima, xilema), aunque los tejidos vegetales no lignificados (floema, parénquima medular) son los más rápidamente degradados. En este sentido, los hongos ruminales son especialmente activos frente a substratos muy lignificados (Joblin *et al*., 1989). De hecho, aunque no está probada su capacidad de utilización de lignina como fuente de nutrientes, *N. frontalis* puede solubilizar pequeñas cantidades de lignina de la pared celular vegetal, probablemente debido a la solubilización de compuestos fenólicos, en mayor medida que las bacterias, aumentando la accesibilidad de los polisacáridos estructurales para las bacterias.

Por otra parte, la acción mecánica de los hongos sobre la pared celular vegetal disminuye la rigidez estructural de los forrajes y favorece la ruptura de las partículas de este aumentando también así la superficie accesible para la acción bacteriana.

Cuantitativamente, la magnitud de la contribución de los hongos a la digestión de la pared celular *in vivo* no esta totalmente esclarecida. Fonty *et al* 1992 observaron que la presencia de hongos en el rumen no tiene un gran efecto sobre la desaparición de materia seca o la concentración de ácidos grasos volátiles, a pesar de que la actividad glucosidasa y polisacaridasa de la población microbiana adherida a las partículas aumenta apreciablemente.

3.5- Virus:

También pueden ser detectados a nivel ruminal virus (bacteriófagos) principalmente en *Bacteroides, Butyrivibrio, Eubacteria, Prevotella, Ruminococcus, Selenomonas, Streptococcus*; siendo su función principal disminuir la concentración y actividad de bacterias ruminales.

3.6- Factores que afectan la población de microorganismos del rumen.

Existen muchos estudios acerca del desarrollo de la mejor población microbiana ruminal y los factores que controlan su balance. Algunos de estos factores están ligados a la fisiología de diferentes especies (máxima velocidad de crecimiento, afinidad por el sustrato, energía metabólica, resistencia a pH ácidos y

compuestos tóxicos, habilidad para adherirse a las partículas de la planta, etc). Esto depende del hospedero y su alimento (composición de la dieta, frecuencia de comidas, cantidades ingeridas, aditivos del alimento, forma en la cual el alimento es presentado, etc.) y de la naturaleza de las relaciones establecidas entre las diferentes poblaciones durante la evolución, como la competencia, el sinergismo, la predación, el mutualismo, etc.

Generalmente se acepta que los principales factores que modifican la población de microorganismos del rumen son:

- La dieta y su manipulación
- Cantidad y frecuencia en el suministro de alimentos
- Cambios diurnos y estacionales
- Procesamiento de la dieta
- Competencia entre protozoos y bacterias
- Especie animal
- Edad

Existen otras variables, que pudieran ser factores, las que también influyen en el número y representación de especies microbianas, entre estas tenemos: El consumo y su velocidad, la selectividad al pastar, la fertilidad del suelo, la situación geográfica, el clima. Estos influyen en la cantidad y calidad de nutrimento que se ofrecerán a los microorganismos del rumen.

3.7- Importancia general de los microorganismos ruminales:

Los microorganiosmos ruminales constituyen un elemento de vital importancia para el mantenimiento de los animales poligástricos, esto se refleja si se tiene en cuenta que del 55 al 85 % de la energía metabolizable (EM) total derivada del alimento consumido, es absorbida desde la pared ruminal como ácidos grasos volátiles (AGV) obtenidos a partir de la acción microbiana sobre este.
La mayoría de las bacterias y de los hongos, pero pocos protozoarios, pueden utilizar amoniaco. En vacas lecheras, la proteína microbiana sintetizada por las bacterias proteolíticas (en especial los géneros *Prevotella*, *Selenomonas* y *Butyrivibrio*) y las bacterias que sintetizan aminoácidos, proporciona casi 60 % de los aminoácidos que llegan al duodeno, lo cual aumenta a 90 % en rumiantes alimentados con dietas bajas en proteína.
La proteína que puede aportar la masa microbiana ruminal representa lo siguiente, respecto al total disponible: 44 % en borregos, 48 % en vacas, 51 % en terneros, 45 % en novillos (alimentados con paja y grano de cebada), 39 % en novillos (alimentados con paja de cebada); además, proporciona todos los aminoácidos indispensables y 60 a 90 % del requerimiento energético y nitrogenado para los rumiantes.

En áreas donde existe escasez de este nutriente, la optimización de proteína microbiana, a través de un uso eficiente de los recursos disponibles localmente, es un alcance sostenido y efectivo hacia la mejora en la producción de los rumiantes, aún en áreas que dispongan de fuentes proteicas, el aumento de la eficiencia biológica de la síntesis de la proteína microbiana es la clave para la mejora del costo de producción y reduce la contaminación con N del ambiente (Orskov, 1997).
Autores como Ángeles, 2002 plantean que en los rumiantes, la presencia de bacterias, protozoarios y hongos le permite cubrir hasta el 100% de sus requerimientos energéticos a partir de carbohidratos estructurales como celulosa, y hemicelulosa, le permite utilizar fuentes de nitrógeno no proteínico (urea, amoníaco) para cubrir una parte de sus necesidades de proteína y además, lo hace independiente de una suplementación de vitaminas hidrosolubles para cubrir sus requerimientos.

Gracias a los microorganismos ruminales cada 15 kg de materia seca consumidos por el animal, 10 kg son degradados y fermentados por lo que pueden ser aprovechados.

3.7.1- Importancia de la proteína microbiana para el rumiante:

El valor nutritivo de la proteína microbiana como fuente de aminoácidos para el rumiante es algo sin discusión. Se estima que la proteína microbiana cubre entre un 50 y un 80% de las necesidades de proteína absorbible del vacuno lechero. Además tiene un alto y consistente valor biológico, con una alta digestibilidad intestinal y un alto contenido de aminoácidos esenciales cuyo perfil es similar al de la proteína de la leche y al tejido muscular. (Rodríguez, 2003)

Con el objetivo de aprovechar el elevado valor biológico de la proteína microbiana, es importante maximizar la síntesis y la eficiencia de síntesis de proteína microbiana en el rumen. Se considera que mejorar la eficiencia podría ser beneficioso para incrementar el aporte de aminoácidos esenciales a un costo relativamente menor que aportando suplementos proteicos en la dieta.

Conclusiones

El sistema digestivo de los animales rumiantes, a diferencia de los animales monogástricos, presenta su estomago dividido en cuatro partes: rumen, retículo, omaso y abomaso. El rumen constituye una cámara de fermentación donde ocurren deferentes procesos de degradación y síntesis microbiana de nuevos compuestos lo que le permite a los rumiantes el aprovechamiento de alimentos fibrosos.

Los microorganismos como bacterias, hongos y protozoos que habitan a nivel ruminal juegan un importante papel en la fisiología digestiva de los rumiantes basándose la subsistencia de esta especie animal en la acción de estos sobre los alimentos. Los que a su vez constituyen la mejor fuente de proteína utilizada por el animal para su mantenimiento y demás procesos fisiológicos aportando estos aminoácidos esenciales de alto valor biológico.

Bibliografía:

- Ángeles Campos, S. C. 2002. Fermentación ruminal, tamaño de partícula y efecto de la fibra en la alimentación de vacas lecheras. Disponible en: http://www.fmvz.unam.mx/bovinotecnia/BtRgZooG014.pdf Consultado: Julio 2007.

- Asanuma, N.; Iwamoto, M y Hino, T. 1999. Effect of the addition of fumarate on methane production. J. Dairy Sci. 82: 780

- Asocras, 2000. Digestive Anatomy in Ruminants. Disponible en: http://www.calfnotes.com. En línea: Mayo 2001. Consultado Marzo 2007.
- Bauchop, T. 1989. Colonization of plant fragments by protozoa and fungi. En: J.V. Nolan, R.A. Leng, D.I. Demeyer (Eds.). The roles of protozoa and fungi in ruminant digestion. Penanbul Books, Armidale. pp.83-96.
- Bohatier, J.; J. Sénaud and M. Benyahya. 1990. *In situ* degradation of cellulose fibres by the entodiniomorph rumen ciliate *Polyplastron multivesiculatum*. Protoplasma, 154: 122-131.
- Calsamiglia, Sergio. 1997. Nuevas bases para la utilización de la fibra en dietas de rumiantes. XIII Curso de especialización FEDNA. Madrid.
- Cheng, K.J. y Costerton, J.W. 1980. Adherent rumen bacteria. Their role in the digestion Digitaria petzii grown with and without sulfur. Appl. Env. Microbiol. 46: 738.
- Church, D.C. 1979. Digestive Physiology and Nutrition of Ruminants OSU Boock Stores Inc. Oregon.
- Cunningham, James G. 1997. Fisiología veterinaria. 2a ed. McGraw- Hill Interamericana. México.
- Delgado, Denia. 2006. Fisiología digestiva del rumiante. Curso: “Estrategias de alimentación para el ganado bovino en la sequía”.Instituto de Ciencia animal. La Habana. Cuba.
- Fondevila, M. 1998. Procesos implicados en la digestión microbiana de los forrajes de baja calidad. Rev. Fac. Agron. (LUZ), 15:87-106. Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.
- Fonty, G and K. N. Joblin. 1991. Rumen anaerobic fungi: their role and interactions with other rumen microorganisms in relation to fiber digestion. pp. 655-679. In: Physiological aspects of digestion and metabolism in ruminants. T. Tsuda, Y. Sasaki, R. Kawashima (eds.). Academic Press, San Diego.
- Fonty, G.; A. Williams; F. Bonnemoy; B Morvan; J. Doré and P. Gouet, P. 1992. Interactions between cellulolytic bacteria, anaerobic fungi and methanogens in the rumen of gnotobiotic lambs. p. 338-342. Proc. Int. Conf. on «Manipulation of rumen microorganisms to improve efficiency of fermentation and ruminant nutrition» . Alejandría, Egipto. 20-23 Septiembre.
- Forbes, J.M. ; France, J. 1993. Special features of the ruminant. En: Quantitative Aspects of Ruminant Digestion and Metabolism. Eds. Forbes, J.M. y France, J. CAB International, UK.

- Galindo, Juana; Marrero, Yoandra; González, Niurca y Areadne Sosa. 2006. Libro en versión electrónica: Manipulación de la fermentación microbiana ruminal. Instituto de Ciencia Animal. La Habana. Cuba.
- González Muñoz, S. S. 2002. Nutrición de rumiantes y utilización de forrajes. Disponible en: http://www.tamaulipas.gob.mx/sedeem/sectores/agrop_pesca/cursos_ganaderia/documentos%5C NutricionrumiantesForrajesSergio.pdf. En Línea: Septiembre 2002. Consultado: Agosto 2007.
- González, N. 2003. Contribución al estudio del ecosistema ruminal de búfalos de río bajo nuestras condiciones de manejo y alimentación. Tesis en opción al grado de Master en Microbiología. Facultad de Biología UH-Instituto de Ciencia Animal. La Habana. Cuba, 60 p.
- Grenet, E.; A. Breton; P. Barry and P. Fonty. 1989. Rumen anaerobic fungi and plant substrates colonization as affected by diet composition. Anim. Feed Sci.Technol., 26: 55-70.
- Hébraud, M. y M. Fèvre. 1988. Characterization of glycosides and polysaccharide hydrolases secreted by the rumen anaerobic fungi *Neocallimastix frontalis*, *Sphaeromonas comunis* and *Piromyces comunis*. J. Gen. Microbiol. , 134: 1123-1129.
- Hespell, R.B. 1979. Efficiency of growth by ruminal bacteria. Feed Proc. 38: 2702.
- Hungate, R.E. 1966. The Rumen and its Microbes. Academy Press Inc., New York.
- Joblin, K. N. y G. E. Naylor. 1989. Fermentation of woods by rumen anaerobic fungi. FEMS Microbiology Letters , 65:111-122.
- Jouany, J. P. y K. Ushida. 1994. Plant cell-wall degradation by rumen protozoa. En: Microorganisms in ruminant nutrition . R.A. Prins y C.S. Stewart (eds.), Nottingham University Press, Nottingham. pp. 69-78.
- Jouany, J.P.; Broudiscou, L.; Pirns, R.A. y Komisarczuk, S. 1995. Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen. En : Nutrition des Ruminants Domestiques. Eds. Jarrige, R. et al. INRA, France.
- Martínez G., E. 2005. Bases fisiológicas y nutricionales de la unidad vaca – ternero. Cenerema. UACH.
- Mc Allister, T. A., Okine, E.K, mathison, G.W y Cheng, K.J. 1996. Dietary, enviromental and microbiological aspects of methane producction in rumnants. An. J. Anim. Sci. 76:231-243.
- Nava Cuellar, Cuauhtémoc; Díaz Cruz, Antonio. 2001. Introducción a la digestión ruminal. Disponible en: http://www.Produccionovina.com.ar/informacion-tecnica/ En línea: Julio. Consultada: Agosto 2007.
- Orpin, C. G. 1983. The role of ciliate protozoa and fungi in the rumen digestion of plant cell walls. Anim. Feed Sci. Technol., 10:121-143.
- Orskov, E. R.; M. Ryle. 1998. Energy nutrotion in ruminants. Chalcombe publications, Painshall. Church Lane, Welton, Lincoln, LN2 3 LT, UK.
- Orskov, E.R. 1997. International Feed Resources Unit. A Report from 1991- 1997. The Rowett Res. Inst. Aberdeen, UK.
- Orskov, E.R. y MacLeod, N.A. 1990. Dietary-induced thermogenesis and feed evaluation in ruminants. Proc. Nutr. Soc. 49. 227.
- Owens, F. N.; a. l., Goetsch. 1986. Digesta passage and microbial protein synthesis. En: Control of digestion and metabolism in rumiants. L. P. Milligan, W. L. Grovum y A. Dobson. Eds. Reston Book, Prentice- Hall, Englamood Cliffs, New Jersey. p 196 – 226.
- Preston, T. R.; Leng, R. A. 1987. Matching Ruminant Products Systems With available resources in the tropics and subtropics. Penambul Books, Armidale CTA,Wageningen,
- Quigley, J. 1997. Bacterias del rumen en terneros. Disponible en: http://www.calfnotes.com. En línea: mayo 2001. Consultado: Marzo 2007.
- Redondo, P. A., 2003. Anatomía del aparato digestivo de un rumiante. Disponible en: http://www.inea.uva.es. En línea: abril. Consultado: Agosto 2007.

- Rodríguez Prado, María. 2003. Factores que afectan la fermentación microbiana, y al perfil y flujo de aminoácidos de las bacterias asociadas con las fracciones líquida y sólida en un sistema de cultivo continuo. Tesis presentada en opción al titulo de Doctor en el programa de Producción animal de la universidad autónoma de Barcelona. Bellaterra.
- Rotger Cerdá, Aina. 2005. Fermentación ruminal, degradación proteica y sincronización energía - proteína en terneras en cebo intensivo. Barcelona. 208 h. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Producción animal) Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad de Barcelona. España
- Roy, J. H. B. 1980. The digestive system of the calf. En: The calf. Forth edition. J. H. B. Roy, Ed. Butterworths. p 201 – 219.
- Ruiz, R. y Dearriba, J. 1987. Digestión ruminal de carbohidratos y absorción de AGV. En Bioquímica Nutricional. Tomo 1. MES, La Habana. Cuba.
- Sodiy Arce, D.; González Martínez, Rocío y Martínez Rangel, S. 2004. Efectos de la defaunación sobre la fermentación. Disponible en: http://www.produccionbovinadecarne.com. Consultado: Julio 2007.
- Sosa Ceijas, Areadne. 2006. Efecto de *Aspergillus oryzae* como activador de la fermentación ruminal de *Pennisetum purpureum* en condiciones *in Vitro.* Tesis en opción al título académico de Master en Microbiología Mención Microbiología General. Facultad de Biología UH-Instituto de Ciencia Animal. La Habana. Cuba, 56p.
- Stewart, C.S. y Bryant, M.P. 1988. The rumen bacteria. In: The rumen Microbial Ecosystem. Edited by P.N. Hobson. Elsevier Science Publishers Ltd. London, England. p21-76.
- Tajima, K.; Aminov, R.I.; Nagamine, T.; Matsui, H.; Nakamura, M.; Benno, Y. 2001. Diet-dependent shifts in the bacterial population of the rumen revealed with real-time PCR. Applied and Environmental Microbiology. 67, 2766.
- Van Soest, P.J. 1982. Nutritional Ecology of the Ruminants. O. and Books, Oregon, USA.
- Van Soest, P.J. 1994. Nutritional Ecology of the Ruminants. Second Ed. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY, 476 pag.
- Wattiaux, M.A & Armentano, L.E. 2000.Metabolismo de los carbohidratos en la vaca lechera. Instituto Babcock. Disponible en: http://babcock.cals.wisc.edu/bab/des/digest/ch5/protein.html . En línea: Marzo 2000. Consultado: julio 2007
- Wattiaux, M.A y Howard, R.T. 2000. Digestion en la vaca lechera. Disponible en: http://www.babcock.cals.wisc.edu/bab/des/digest/ch1/dig.html . En línea: Marzo 2000. Consultado: febrero 2007.
- Wattiaux, M.A. 2000. Metabolismo de proteínas en las vacas lecheras. Instituto Babcock. Disponible en: http://babcock.cals.wisc.edu/bab/des/digest/ch5/protein.html En línea: Marzo 2000. Consultado: julio 2007
- Williams, A. G. and G. S. Coleman. 1988. The rumen protozoa. p. 77-128. En: The rumen microbial ecosystem. P.N. Hobson (ed.), Elsevier Applied Sciences, Londres.
- Williams, A. G.; S. E. Withers and G. S. Coleman. 1984. Glycoside hydrolases of rumen bacteria and protozoa. Curr. Microbiol. 10: 287-294.
- Yokohama, M. T. ; K. A, Johnson. 1988. Microbiología del rumen e intestino. El rumiante, fisiología digestiva y nutrición. C. D. Church, Ed. Editorial Acribial. Zaragoza. España. P 137 – 158.