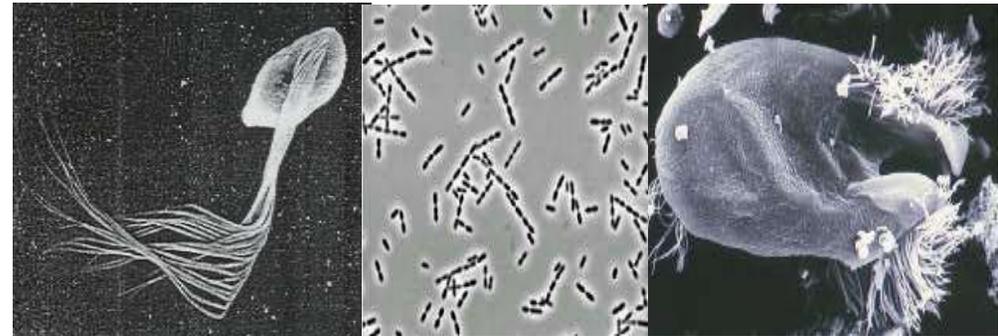


Folleto técnico

Importancia de los forrajes en la productividad lechera



Fotografía: Dr. Filogonio Jesús Hernández Guzmán



Hongo

Bacterias

Protozoo

Microorganismos ruminales

Fotografía: Dr. Miguel Ángel Mata Espinoza

Autores: Filogonio Jesús Hernández Guzmán¹, Sergio Iban Mendoza Pedroza¹, Miguel Ángel Mata Espinosa², Leodan Tadeo Rodríguez Ortega³, Patricia Landa Salgado², Mauricio Velázquez Martínez⁴, Perpetuo Álvarez Vázquez⁵, Alejandro Rodríguez Ortega³

¹Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo, Estado de México. ²Universidad Autónoma Chapingo. ³Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias Campo Experimental San Luis. ⁵Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Universidad Politécnica de Francisco I. Madero
Km 2 Carretera Tepatepec - San Juan Tapa, Hidalgo, México
Francisco I. Madero, Hidalgo. México. CP 42660.

Folleto técnico
Importancia de los forrajes en la productividad lechera

ISBN: 978-607-9260-26-2

Primera edición: junio del 2023

Derechos Reservados: Esta publicación se distribuye en formato pdf de forma gratuita en la página de la Universidad Politécnica de Francisco I. Madero (<https://upfim.edu.mx/>) en la sección de publicaciones (<https://upfim.edu.mx/publicaciones/>). Esta prohíbe su modificación o edición en cualquier otro formato.

Comité Científico Editorial:

Filogonio Jesús Hernández Guzmán

Miguel Ángel Mata Espinosa

Mauricio Velázquez Martínez

Leodan Tadeo Rodríguez Ortega

Alejandro Rodríguez Ortega

Directorio

Dr. Leoncio Marañón Priego
Rector de la Universidad Politécnica de Francisco I. Madero,

Lic. Roberto Nava Lira
Secretario Académico

C.P.A. Homero Gómez Ramírez
Secretario Administrativo

M. en C. María de la Luz Estrada Hernández
Directora del Programa de Producción Animal

L. C. José Erick Juárez Martínez
Jefe de la subdirección de Recursos Materiales

La leche se forma en las células epiteliales de los alveolos de la glándula mamaria y su calidad dependerá de la proporción de grasa, proteína, minerales, lactosa y agua que ésta contenga. En este proceso es muy importante la degradación de la fibra por los microorganismos que se encuentran en el rumen. El ecosistema ruminal está compuesto por bacterias, protozoarios, hongos y arqueas; estos microorganismos trabajan sin oxígeno. Las bacterias son las más numerosas y ocupan 2/3 de la biomasa microbiana ruminal. Durante el proceso de degradación de la fibra, los hongos, bacterias y arqueas se fijan a la fibra mientras los protozoarios bajan por el espacio ruminal.

Formación de grasa

La digestibilidad de la fibra de los forrajes tanto en gramíneas como leguminosas está dada por la proporción de lignina. En gramíneas la lignina está tanto en el exterior como interior de las células vegetales (Figura 1).

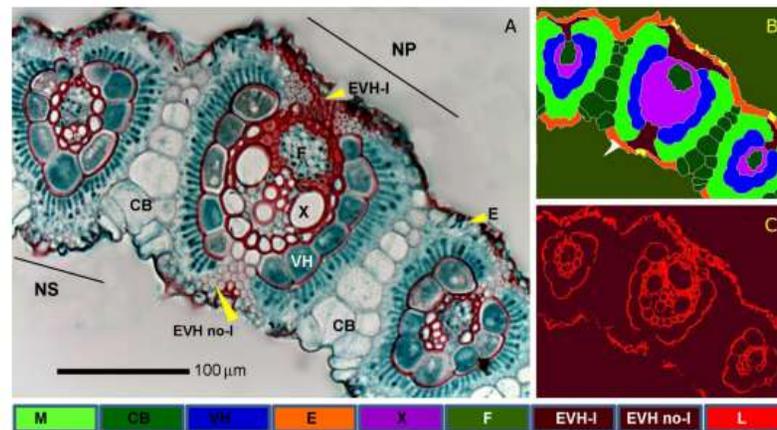


Figura 1. Corte transversal de la hoja de *Bouteloua curtipendula*. A) Tinción con safranina-O y verde rápido FCF. B) Segmentación de una imagen con el software GIMP. 2.8. C) La presencia de lignina se muestra en rojo, NP: nervadura principal; NS: nervadura secundaria; M: mesófilo; CB: células buliformes; VH: vaina del haz vascular; E: epidermis; X: xilema; F: floema; EVH-l: extensión lignificada de la vaina del haz; EVH no-l: extensión no lignificada de la vaina del haz vascular (Bernal *et al.*, 2017).

En leguminosas la lignina se encuentra en la misma proporción, sin embargo, la estructura de la pared celular se asemeja a un “enrejado” por donde se facilita la entrada de las enzimas de los microorganismos para degradar la celulosa y contenido celular (Figura 2).

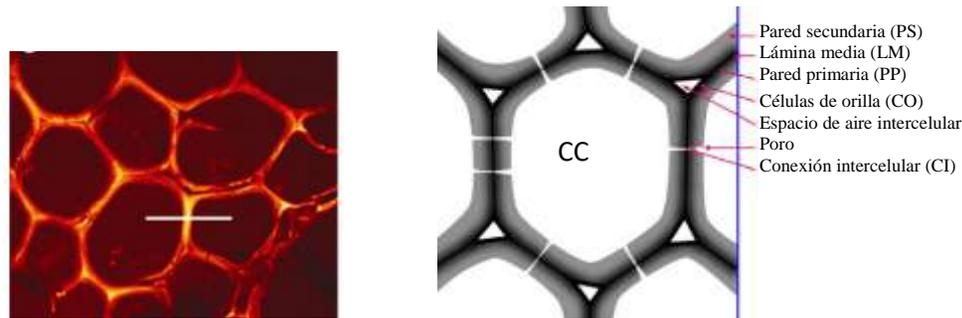


Figura 2. Estructura de la pared celular en alfalfa. A mayor edad de rebrote engrosa las células de orilla (CO). Los poros y las conexiones intercelulares (CI) permiten el paso de agentes hidrolíticos entre el contenido celular (CC), contrario a gramíneas (Zeng *et al.*, 2010).

En los forrajes, la presencia de lignina es indispensable para el sostén de la planta, pero por otro lado influye negativamente en la digestibilidad de la fibra, por tanto, a medida que aumenta la madurez de los forrajes, aumenta el contenido de lignina, de aquí la importancia en definir el momento de la cosecha.

La célula vegetal de las plantas forrajeras está compuesta por carbohidratos estructurales (pared celular) y solubles (contenido celular). La pared celular está formada por celulosa, hemicelulosa y lignina, principalmente. El material de unión entre las paredes celulares está compuesto por pectinas, gomas y mucílagos, compuestos 100 % metabolizables por las enzimas de los microorganismos. Por otro lado, el contenido celular está conformado por carbohidratos simples (mono y disacáridos) y almidón, todos 100 % metabolizables por las enzimas interiores de los microorganismos del rumen.

La celulosa es la molécula más abundante en la pared celular de las plantas forrajeras, está formada por cadenas lineales de glucosa unidas por enlaces β 1,4 (Figura 3).

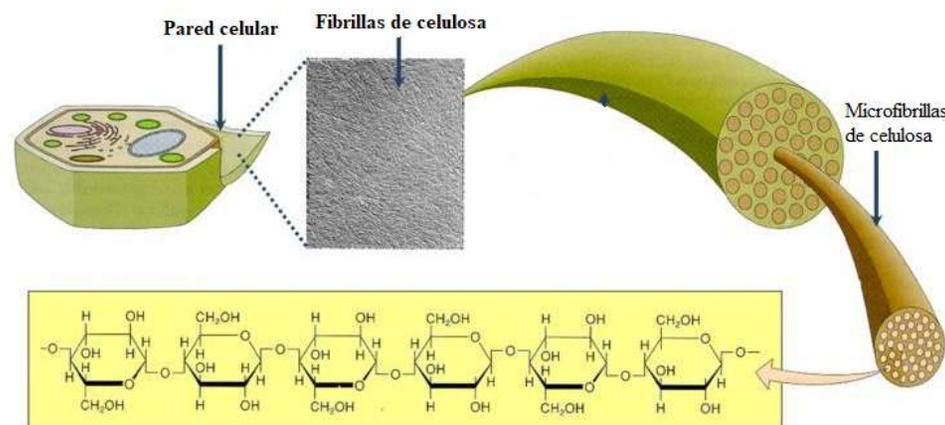


Figura 3. La celulosa en las plantas forrajeras; moléculas de glucosa unidas por enlaces β 1,4. <https://beautifulsci.wordpress.com/2014/03/>

La digestibilidad de la fibra de los forrajes depende en gran medida de la abundancia de lignina en proporción con celulosa y hemicelulosa. Según Van Soest (1967), la fibra detergente neutro (FDN) contiene solamente celulosa y hemicelulosa, mientras la fibra detergente ácido (FDA) contiene celulosa, hemicelulosa y lignina.

Los microorganismos ruminales en especial bacterias y hongos, segregan enzimas que actúan sobre los enlaces β 1,4 glucosídicos de la celulosa. Las glucosas son liberadas y salen por la epidermis para ser metabolizadas, pero no todas son capturadas por hongos y bacterias, por lo que algunas se encuentran libres en el líquido ruminal, las cuales son captadas y metabolizadas por protozoarios.

El metabolismo de los carbohidratos (glucosa) se lleva a cabo en el citoplasma celular microbiano, mediante el proceso de la fermentación. Los ácidos grasos volátiles (AGV) son producto del metabolismo de glucosa y su formación se da en el ciclo de Krebs dentro de la mitocondria (Figura 4).

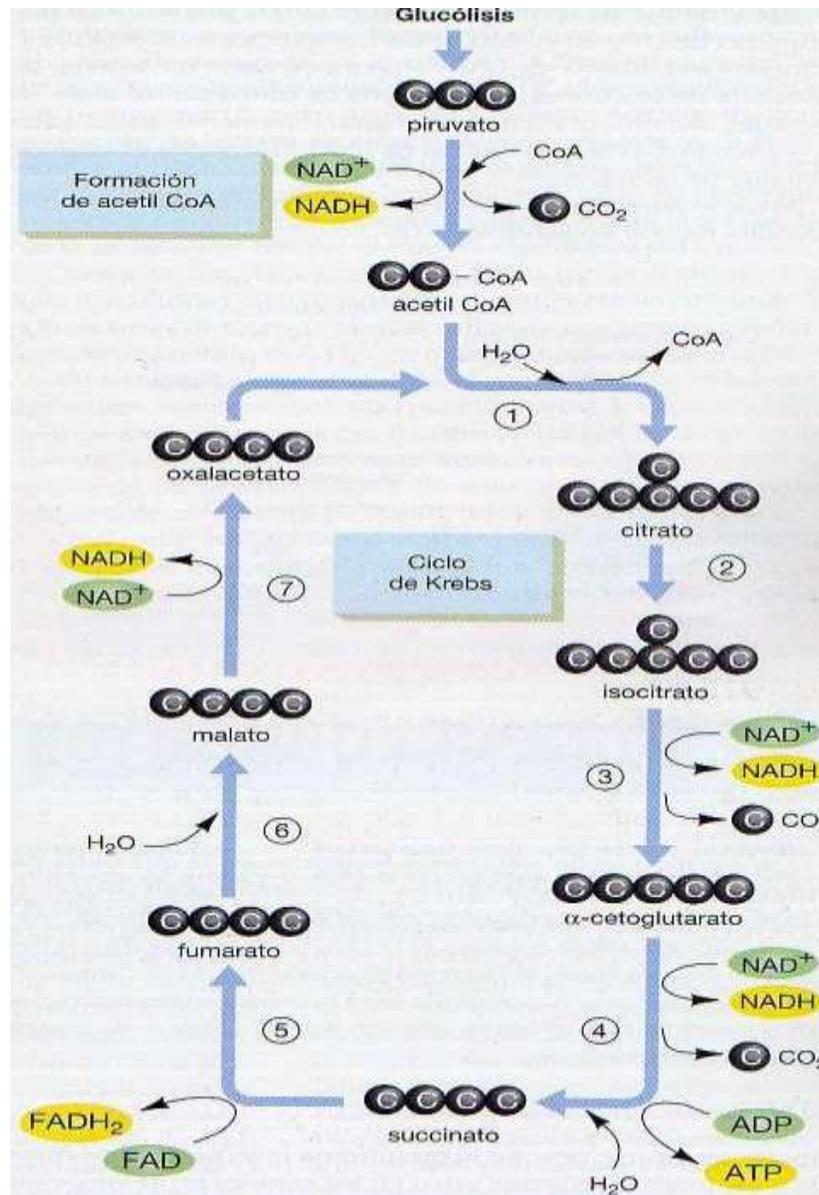


Figura 4. Proceso de metabolismo de una molécula de glucosa hasta el ciclo de Krebs. Tomado de Lehninger (2019).

Los AGV resultan de vital importancia para la productividad ganadera (ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico) y cuando un rumiante consume solamente forraje (figura 5), la proporción en leche es 50 % acetato, 30 % butirato y 20 % propionato:

$\text{CH}_3\text{-COOH}$. - ácido acético

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-COOH}$. - ácido propiónico

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$.- ácido butírico

Figura 5. Vacas lecheras en pastoreo de alfalfa con ballico perenne. Fotografía de Mauricio VM.



La proporción de AGV en rumen es muy importante ya que, dependiendo de la concentración de éstos, se verá reflejado en el porcentaje de grasa de la leche, y a su vez en mayor grosor de la nata. Según Castro-Hernández *et al.* (2014) la grasa de la leche es una combinación de ácidos grasos (AG) saturados e insaturados (C12:0, C13:0, C14:0, C16:0, C16:1, C18:0, C18:1n9c, C18:2n6c, C18:3n3) la síntesis de estos AG depende principalmente de la presencia del ácido acético, ya que durante la formación de estos ácidos se van agregando moléculas de dos carbonos (ác. acético) a la cadena, hasta formar una cadena de 16 carbonos; ác. Palmítico, o de 12, 13, 14, 18, según corresponda (Figura 6). El lugar donde se forman los ácidos grasos es el retículo endoplásmico liso de las células epiteliales en los alveolos de la glándula mamaria.

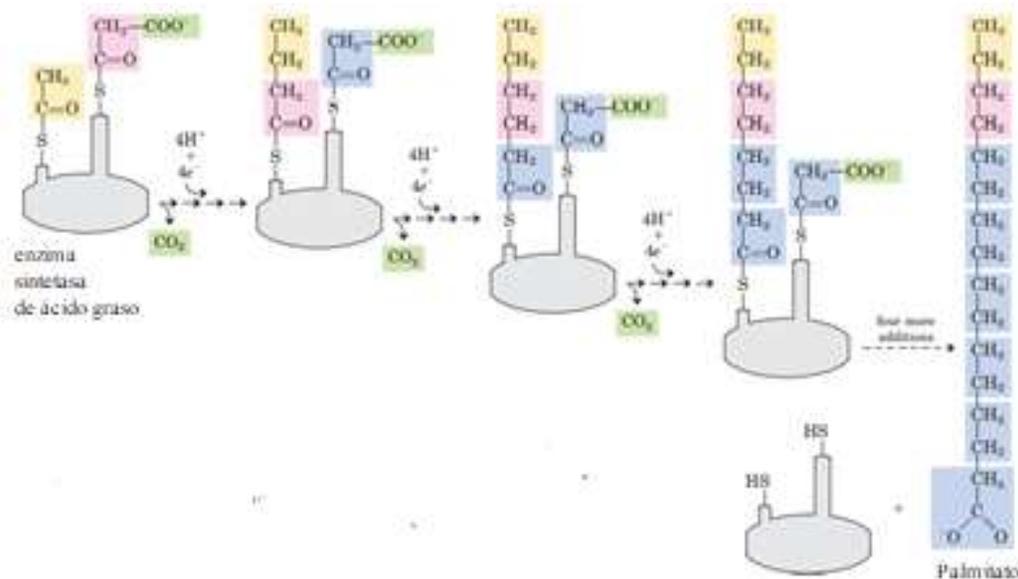


Figura 6. La cadena de ácido graso crece por unidades de dos carbonos donadas por malonato activado, con pérdida de CO₂ en cada paso. El grupo acetil inicial está sombreado en amarillo, C-1 y C-2 del malonato están sombreados en rosa, y el carbono liberado como CO₂ está sombreado en verde. Después de cada adición de dos carbonos, las reducciones convierten a la cadena en crecimiento en un ácido graso saturado de cuatro, luego seis, luego ocho carbonos, y así sucesivamente. El producto final es palmitato (16:0). Tomado de Lehninger (2019).

Los tres AGV formados en la mitocondria de la microbiota ruminal atraviesan el epitelio ruminal y se incorporan al torrente sanguíneo. El objetivo del butirato y acetato es producir energía de acción inmediata, mientras el propionato se va a hígado y ahí se forma nuevamente glucosa; la energía producida a partir de estos tres AGV representa hasta el 85 % de la energía requerida por el animal.

La mejor degradación de la fibra en rumiantes para obtener una mayor producción de AGV, es cuando el pH del rumen se encuentra en un intervalo de 6.2 a 6.8. A este pH se maximiza la utilización de la fibra ya que las bacterias celulolíticas tienen su mejor desempeño. Este pH se logra mediante un buen proceso de rumia, que a su vez depende de dar al animal alimento mezclado que incluya concentrado + forraje. Una vaca de 500 kg, con un buen proceso de rumia, puede producir 150 L de saliva con un pH de 7.2, lo cual ayudará según Dehority (2003) a regular el pH del rumen en este intervalo (6.2 a 7.0).

Una vaca que está en pastoreo siempre producirá más grasa independientemente de la raza, pero al agregar alimento concentrado, el ganado produce más leche, pero con menos grasa. La grasa en leche en algunas especies de mamíferos rumiantes promedia: vaca 3.5 %, borrega 7 %, cabra 3.5 % y conejo 12 %.

Formación de proteína

La proteína de la leche está formada por caseína, albúmina, inmunoglobulinas, proteínas del lactosuero, lactoferrinas y proteínas de la membrana del glóbulo graso. Por lo anterior, puede ser de dos fuentes, del alimento que consume el animal, pero también de los microorganismos. En un rumiante en lactancia alimentado a base de forrajes, la proteína láctea estará constituida principalmente por la proteína proveniente de los microorganismos. Por esta razón, la calidad del forraje proporcionado toma relevancia, ya que los microorganismos ruminales requieren nitrógeno (N) para su multiplicación y aumento de la masa celular. Así, en los forrajes, a menor edad de rebrote hay mayor concentración de proteína (más Nitrógeno). Otra fuente de N vegetal, puede ser proporcionado con plantas arbustivas forrajeras con alta concentración de proteína, como el guaje (*Leucaena leucocephala*; 22 % N), alfalfa, tréboles o morera (*Morus alba*; 17 % N) entre otros, de forma que se complemente el requerimiento de proteína por el animal

La formación de proteína de la leche es en los ribosomas del retículo endoplásmico rugoso en los alveolos de la glándula mamaria. Las proteínas de la leche son cadenas de aminoácidos (aa) unidos por enlaces peptídicos; sin embargo, cuando no se tiene buen perfil de aminoácidos la producción de leche es menor. Por tanto, dependiendo el perfil de aa que tenga el alimento será la formación de proteínas lácteas.

Los microorganismos en el estómago glandular del rumiante (abomaso) son desnaturalizados por el pH bajo (1 a 2) y enseguida en la primera sección del intestino delgado, que es el duodeno, también reciben las “descargas” de las enzimas tripsina y quimitripsina del páncreas, por lo que bacterias, hongos y protozoarios pasan a constituir parte de la energía y proteína que el animal aprovecha. Por tanto, la microbiota ruminal es fuente de nutrientes como fosfolípidos, aminoácidos, proteínas, glucósidos, minerales, ácidos nucleicos, que son metabolizados en intestino y absorbidos a través de las vellosidades intestinales, que a su vez servirán en el metabolismo celular de los animales. En el torrente sanguíneo, cada

nutriente será utilizado de acuerdo a su estructura molecular, en este caso los aa y proteínas, que anteriormente formaron parte de la proteína microbiana, serán parte de la síntesis de proteína de la glándula mamaria para su deposición en la leche así sintetizada.

¿Cómo es la multiplicación de microorganismos ruminales?

Como se mencionó anteriormente, dependiendo de la cantidad de N en las plantas forrajera, así será la multiplicación de los microorganismos. Un rumiante necesita como mínimo 7 % de proteína para que éste no disminuya la condición corporal; sin embargo, para producción, hay que proporcionar forraje con mayor proporción de hoja, ya que contiene mayores niveles de N con respecto a tallos, y dicho de paso, las leguminosas tienen más proteína en comparación a gramíneas, y también, pastos con metabolismo C3 tienen más proteína y digestibilidad en comparación a pastos de metabolismo C4.

Las leguminosas como la alfalfa tienen a 30 días de rebrote alrededor de 16-18 % de proteína cruda (PC) y 55 % de digestibilidad, mientras que los pastos C3 como el *rye grass* (ballico) u *orchard grass* (ovillo) tienen 11-12 % PC y 50 % de digestibilidad, lo cual no es tan malo; sin embargo, los pastos tropicales o de zona semiárida de metabolismo C4 su calidad dependerá del manejo; sin embargo estas especies al momento de la polinización tienen 8 % de PC y 47 % de digestibilidad, pero una vez en estado maduro, la proteína puede ser de 6 % o menos y 40 % de digestibilidad, lo cual, limita la multiplicación de los microorganismos ruminales.

Pero la pregunta vuelve a surgir, como es que el contenido de proteína puede influir en la multiplicación de los microorganismos. Considerar que las bacterias son microorganismos procariotes (sin núcleo definido) y que se multiplican por bipartición, gemación o esporulación; los hongos por esporulación y los protozoarios por bipartición. Estos microorganismos necesitan un buen perfil de aminoácidos y sobre todo los esenciales para formar proteínas. Cabe mencionar que las proteínas son aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Pero ¿Por qué es tan importante que los rumiantes consuman alimento con buen perfil de aa?, lo explicaremos con la figura 7.

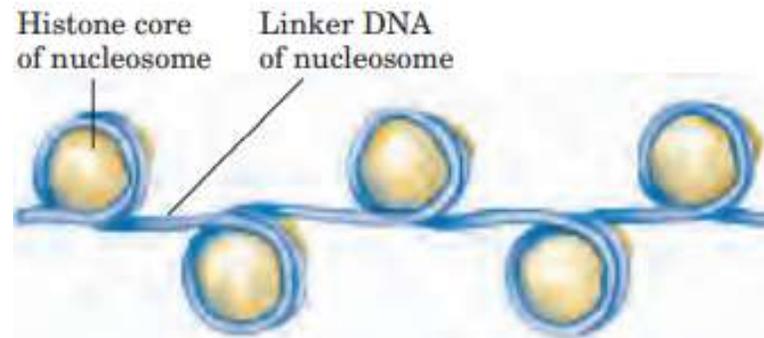


Figura 7. Fracción de ADN. Tomado de Lehninger (2019).

Las proteínas en el ADN (disperso en el citoplasma de los microorganismos ruminales) se llaman histonas, y para su formación, los animales deberán consumir forraje de calidad o suplemento con buen perfil de aa. También dicho de paso que en cada membrana de cada microorganismo está formado por dos capas de fosfolípidos y una de proteína, donde el nivel de N de los alimentos vuelve a tomar importancia.

Cuando el pH del rumen se encuentra entre 6.2 y 6.8 los microorganismos se multiplican con eficiencia (por bipartición, gemación o esporulación; Figura 8).

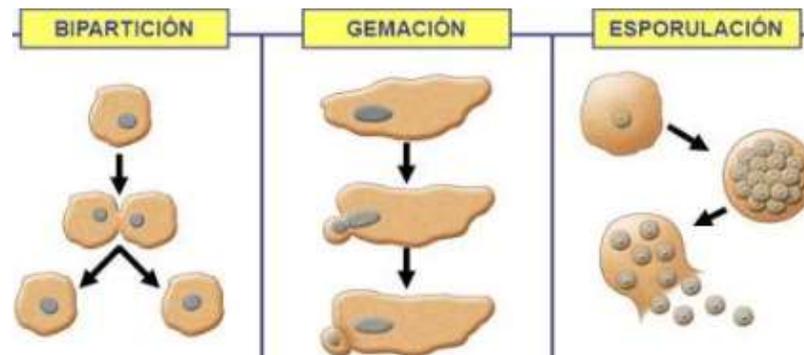


Figura 8. Tipos de multiplicación en microorganismos ruminales.

https://www.google.com/search?q=gemacion+microorganismos&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjvxp2vmPT7AhW1JkQIHVhuDQAQ_AUoAXoECAlQAw&biw=1517&bih=694&dpr=0.9

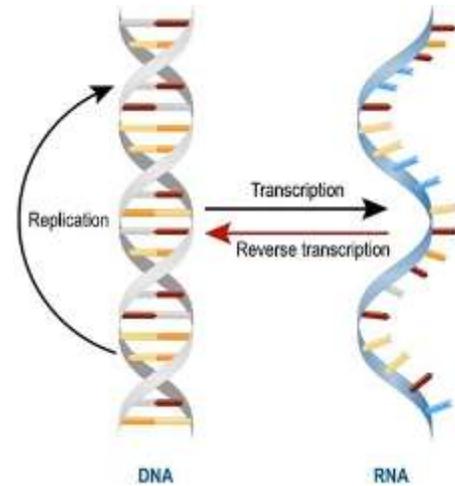
Por lo anterior, se ve sencillo, pero los pasos de forma detallada son capítulos de libros que trataremos de resumir. Para la multiplicación rápida de microorganismos se necesita un buen perfil de aminoácidos en el alimento, ya que cada aminoácido codifica para un orden de bases nitrogenadas;

	U	C	A	G				
U	<p>UUU Fenilalanina</p> <p>UUA Leucina</p> <p>UUC</p> <p>UUG</p>	<p>UCU Serina</p> <p>UCC</p> <p>UCA</p> <p>UCG</p>	<p>UAU Tirosina</p> <p>UAC</p> <p>UAA Código de parada (stop codon)</p> <p>UAG</p>	<p>UGU Cisteína</p> <p>UGC</p> <p>UGA Código de parada (**)</p> <p>UGG Triptófano</p>	U	C	A	G
C	<p>CUU Leucina</p> <p>CUC</p> <p>CUA</p> <p>CUG</p>	<p>CCU Prolina</p> <p>CCC</p> <p>CCA</p> <p>CCG</p>	<p>CAU Histidina</p> <p>CAC</p> <p>CAA Glutamina</p> <p>CAG</p>	<p>CGU Arginina</p> <p>CGC</p> <p>CGA</p> <p>CGG</p>	U	C	A	G
A	<p>AUU Isoleucina</p> <p>AUC</p> <p>AUA</p> <p>AUG Metionina (Iniciación)</p>	<p>ACU Treonina</p> <p>ACC</p> <p>ACA</p> <p>ACG</p>	<p>AAU Asparagina</p> <p>AAC</p> <p>AAA Lisina</p> <p>AAG</p>	<p>AGU Serina</p> <p>AGC</p> <p>AGA Arginina</p> <p>AGG</p>	U	C	A	G
G	<p>GUU Valina</p> <p>GUC</p> <p>GUA</p> <p>GUG</p>	<p>GCU Alanina</p> <p>GCC</p> <p>GCA</p> <p>GCG</p>	<p>GAU Acido Aspartico</p> <p>GAC</p> <p>GAA Acido Glutámico</p> <p>GAG</p>	<p>GGU Glicina</p> <p>GGC</p> <p>GGA</p> <p>GGG</p>	U	C	A	G

y por consiguiente esas bases nitrogenadas + los aminoácidos formarán el ADN de la microbiota. ¿Qué pasa si faltan aminoácidos esenciales?, si así fuere, no se multiplica con éxito la nueva generación de microorganismos, por consiguiente, se pierde la productividad del sistema.

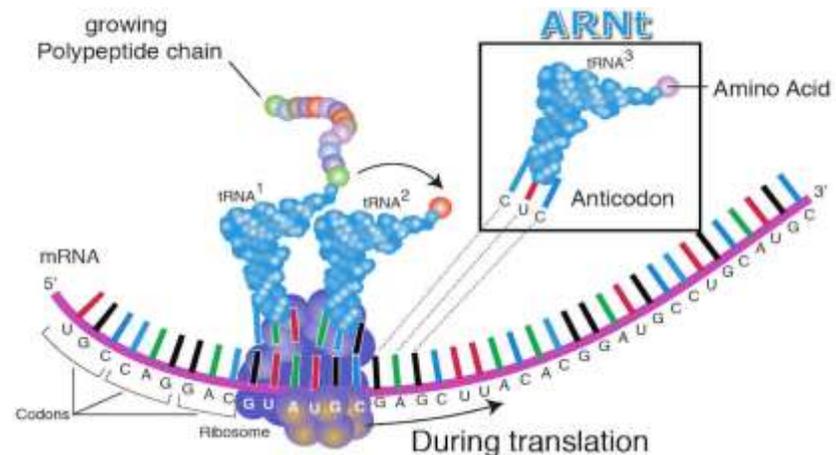
Primeramente, se transcribe el ADN del microorganismo (Figura 9), esto es, que de ADN (que es de doble hélice) a ARN mensajero (que es una hélice).

Figura 9. Transcripción del ADN a ARNm.
Tomado de Lehninger (2019).



Pero lo siguiente, ¿Cómo es que se forma la doble hélice?, bueno es aquí donde entra en juego el ARN de transferencia (t) y ribosomal (r). El primero (ARN t) va a tomar los aa disponibles y un anticodón para colocarlo en el ARNm y así poco a poco terminar la doble hélice, una vez que se ha duplicado el ADN en el ribosoma, así como los demás componentes celulares, el organismo se encuentra listo para su multiplicación y dar origen a un microorganismo nuevo ya está completo y listo para sus funciones metabólicas y fisiológicas.

Figura 10. Formación de la doble hélice en el ADN de los microorganismos, donde los aminoácidos juegan un papel importante.
Tomado de Lehninger (2019).



Proteína metabólica

Los rumiantes tienen movimientos peristálticos en el rumen y en cada mililitro de líquido que transita por el omaso, contiene de 10 a 50 mil millones de microorganismos y se ha comprobado que, en el duodeno de las vacas lecheras, pueden llegar alrededor de 1300 a 2100 g por día. Cuando los microorganismos están en el abomaso (secreción de HCL) son desnaturalizados por el pH muy bajo y después en duodeno, tanto páncreas como hígado (bilis) secretan enzimas para disminuir el tamaño (degradación) de moléculas de forma tal que se facilite la absorción en las vellosidades del intestino delgado. Los microorganismos le aportarán al animal propiamente dicho, vitaminas del complejo B, minerales, proteína (aminoácidos), fosfolípidos, glucosa y disacáridos, entre otros.

Especificidad

La microbiota ruminal y sus enzimas son específicas para celulosa, hemicelulosa, almidón, ácido láctico, pectina, mucílagos; sin embargo, dependiendo del alimento a proporcionar a los bovinos, ovinos o cabras, se puede “modificar” la microbiota con la inclusión de aditivos (*Lactobacillus* o levaduras como *Saccaromyces*) como se indica en el estudio de Shah *et al.* (2022) para aprovechar sustratos como la quitina procedente de la cáscara de camarón.

Conclusiones

Los rumiantes han evolucionado para la degradación y utilización de fibra contenida en los alimentos forrajeros. En el caso de rumiantes lecheros, agregar alimento concentrado en la ración disminuye la proporción de sólidos y aumenta la cantidad de leche, lo cual, no es negativo; sin embargo, para tener una buena función ruminal, es necesario mezclar el forraje + concentrado para que la salivación producida amortigüe una caída drástica del valor de pH y se mantenga un valor adecuado (6.2 a 6.8) y no cause una disminución en la población microbiana, ya que si esto ocurre, el rumen tardará de 5 a 6 horas en recuperar su población microbiana inicial.

Los rumiantes en pastoreo, ya sea en praderas o pastizales, dependen totalmente de la actividad de la microbiota ruminal y por ende del manejo que se hace del recurso forrajero que se produce y que el animal rumiante consume.

Los nutrientes que constituyen la microbiota ruminal formarán parte de las proteínas y grasas de la leche.

Referencias

- Bernal-Flores A., Quero-Carrillo A.R., Zavaleta-Mancera H-A., Pérez-Rodríguez P., Valdez-Carrasco J. y Ortega-Cerrilla M. E. 2017. Atributos histológicos relacionados con digestibilidad en *Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr. de México. Revista Fitotecnia Mexicana 40 (3): 299-308.
<https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/40-3/6a.pdf>
- Dehority B.A. 2003. Rumen microbiology. Nottingham University Press. UK. 373 p.
- Nelsol D.L. y Cox, M. M. Lehninger Principios de Bioquímica 7ª edición. 2019. Editorial Omega. 1304 p.
- Shah A.M., Qazi I.H., Matra M., Wanapat M. 2022. Role of Chitin and Chitosan in Ruminant Diets and Their Impact on Digestibility, Microbiota and Performance of Ruminants. Fermentation 8 (10): 549. 19 p.
<https://doi.org/10.3390/fermentation8100549>
- Van Soest P.J. and Wine R.H. 1967. Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. IV. Determination of Plant Cell-Wall Constituents. Journal of the Association of Official Analytical Chemists 50: 50-55. <https://doi.org/10.1093/jaoac/50.1.50>
- Zeng Y., Saar B. G., Friedrich M. G., Chen F., Liu Y.S., Dixon R. A., Himmel M.E., Sinney X.X., Ding S.Y. 2010. Imaging Lignin-Downregulated Alfalfa Using Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Microscopy. BioEnergy Research, 3(3): 272–277. doi:10.1007/s12155-010-9079-1