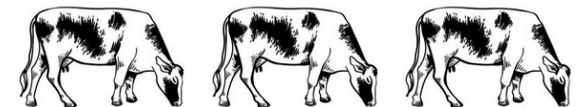


# Fisiología digestiva en rumiantes

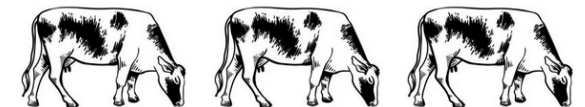
Rolando Demanet Filippi  
Dr. Ingeniero Agrónomo  
Facultada de Ciencias Agropecuarias y Medio Ambiente  
Universidad de la Frontera

Cátedra de Producción de Carne  
2024

- ✓ La capacidad que poseen los rumiantes de utilizar alimentos que otras especies animales no pueden usar se debe a su aparato digestivo
- ✓ Del punto de vista anatómico el aparato digestivo de los rumiantes presenta cuatro compartimentos: rumen, retículo, omaso y abomaso
- ✓ En el rumen es donde se efectúa la mayor digestión de los alimentos, en el retículo y omaso se ejercen funciones mecánicas en la digestión y en el abomaso o estómago glandular se realiza una parte importante de la digestión enzimática



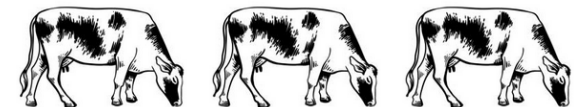
- ✓ Del punto de vista fisiológico el rumen es un órgano que forma una cámara de fermentación que posee diversas funciones:
  - Facilita la mezcla y humidificación del material ingerido que permite el contacto de los microorganismos con el sustrato
  - Ayuda al libre tránsito de la ingesta a través de los compartimentos digestivos situación que facilita el eructo y la regurgitación
  - Suministra el medio para el desarrollo de la microflora ruminal, responsable de la digestión de compuestos como celulosa y hemicelulosa junto a la síntesis de la proteína microbiana y ácidos grasos volátiles que componen la fuente más importante de energía para el rumiante
  - Permite la absorción de ácidos grasos volátiles y agua a través de la mucosa ruminal



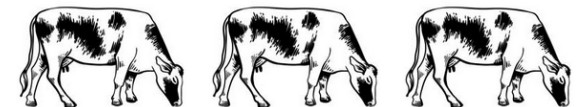
# **Contracciones del rumen-retículo**

---

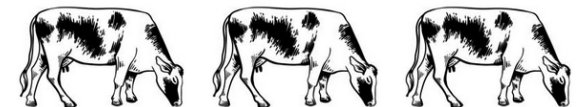
- ✓ La sincronización de los movimientos del complejo rumen-retículo permiten mezclar el alimento recién ingerido con el que se encuentra en el rumen
- ✓ Los movimientos sincronizados favorecen a los procesos de regurgitación, eructación y paso de la ingesta al omaso
- ✓ El rumen posee movimientos continuos producto de la presencia de los pilares que se dilatan y contraen modificando el tamaño de los compartimentos que posee este órgano del rumiante



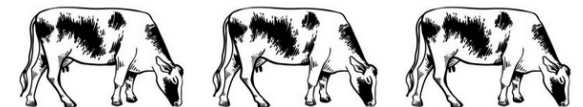
- ✓ Los movimientos ruminales poseen una frecuencia de 3 cada 2 minutos y son de tipo primario y secundario
- ✓ Las contracciones primarias corresponden a movimientos que facilitan la mezcla de la ingesta y el movimiento entre compartimentos
- ✓ Las contracciones secundarias son movimientos coordinados del complejo rumen-retículo y sincronizados con el diafragma y cardiacas, que permiten la rumia y eructación
- ✓ Algunos factores que modifican la actividad del rumen-retículo puede ser el timpanismo (meteorismo o empaste), la cantidad y consistencia de alimentos, entre otros



- ✓ Un aspecto relevante en el proceso de alimentación de los rumiantes es el mezclado de la ingesta una vez que ingresa al retículo
- ✓ A través de las contracciones rumino-retículo el alimento fibroso ingerido por el animal es impulsado al saco dorsal del rumen donde es embebido en forma continua por el líquido ruminal
- ✓ Por otra parte, el alimento finamente molido ubicado en la parte ventral del retículo pasa al omaso
- ✓ El alimento fibroso presente en el saco dorsal del rumen se ubica allí para ser regurgitado y remasticado durante el proceso de la rumia



- ✓ El tiempo de paso del alimento a través del complejo rumen-retículo, es variable y está relacionado con el tiempo de rumia, tipo de alimento, cantidad y textura
- ✓ Un proceso constante es el intercambio de agua entre el rumen y el retículo donde parte de ella es absorbida en las paredes ruminales

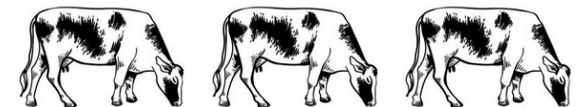




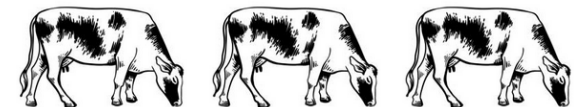
**Rumia**

---

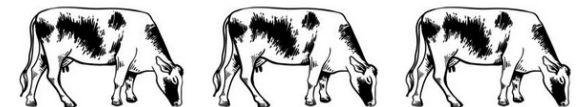
- ✓ La rumia es el evento mediante el cual el forraje ingerido retorna a la boca para ser remasticado y re ingerido
- ✓ Corresponde a una función de importancia para que se desarrolle la perfecta digestión de los alimentos ingeridos por un rumiante
- ✓ En ambientes naturales este es un proceso de sobrevivencia dado que el rumiante consume una alta cantidad de forraje que posteriormente es triturado y molido a través de la rumia que desarrolla en áreas protegidas de sus depredadores



- ✓ La rumia se activa al contacto del forraje con la mucosa del rumen-retículo donde es determinante el tamaño de las partículas
- ✓ Partículas finamente molidas inhibe el proceso de rumia
- ✓ Partículas de tamaño superior a 2,5 cm estimula la rumia



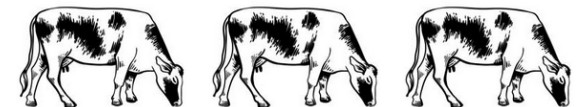
- ✓ El proceso de rumia puede ser dividido en cinco etapas claramente diferenciadas:
- ✓ Regurgitación de la ingesta desde el rumen-retículo
- ✓ Deglución de los líquidos presentes en el bolo regurgitado
- ✓ Re masticación de los sólidos regurgitados
- ✓ Re insalivación de la ingesta
- ✓ Re deglución del bolo



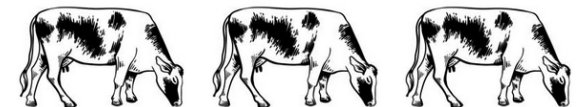
**Eructación**

---

- ✓ La eructación es el proceso mediante el cual los rumiantes expulsan el gas producido por la fermentación ocurrida en el rumen-retículo
- ✓ Un bovino adulto puede eliminar hasta 600 litros de gas/día compuesto por bióxido de carbono, metano, nitrógeno y oxígeno
- ✓ La eructación ocurre por contracciones secundarias del rumen y asociadas a la dilatación del cardia



- ✓ El gas sale libremente hacia la faringe de donde puede ser inspirado hacia los pulmones o expulsado hacia el exterior
- ✓ El eructo es inhibido cuando el rumen está distendido por gas
- ✓ Entre los factores que inhiben la dilatación corresponden a la presión de la ingesta, espuma o líquido sobre el cardia lo cual puede producir estados de timpanismo (meteorismo o empaste)

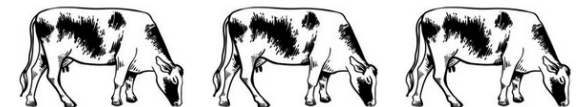


# **Ecología del rumen**

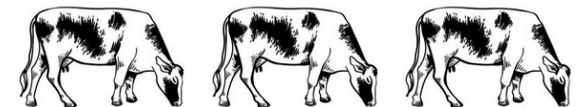
---



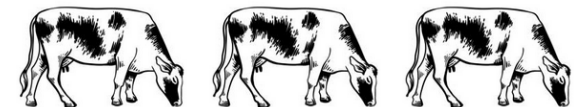
- ✓ El rumen es un ecosistema complejo donde los nutrientes consumidos por microorganismos se digieren en un ambiente anaeróbico
- ✓ Los productos finales de la fermentación son los ácidos grasos volátiles (AGV) y la biomasa microbiana
- ✓ La capacidad de los microorganismos ruminales para producir las enzimas necesarias para los procesos de fermentación permite a los rumiantes obtener eficientemente la energía contenida en los forrajes
- ✓ El proceso de fermentación ruminal no es completamente eficiente porque produce algunos productos finales como es el gas metano y en ocasiones exceso de amoníaco



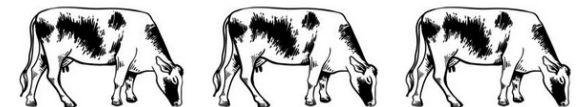
- ✓ El contenido ruminal es el medio donde habitan los microorganismos del rumen: bacterias y protozoarios
- ✓ Los microorganismos sus metabolitos, saliva, agua y el sustrato alimenticio, determinan la naturaleza de la ecología del rumen
- ✓ La temperatura ruminal se ubica entre 39°C y 40°C y está determinada por el proceso de fermentación bacteriana y la actividad metabólica del animal
- ✓ El pH del rumen se encuentra entre 5,5 y 7,1 y sus variaciones se deben a los ácidos orgánicos de la dieta y cantidad de saliva que actúa como agente amortiguador



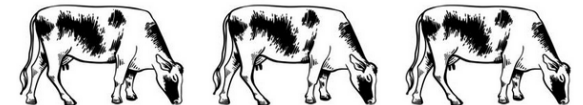
- ✓ El alimento en base a granos y concentrados induce un pH ácido y puede causar **acidosis ruminal** si no es amortiguado en forma eficiente por la saliva
- ✓ Las dietas con alto contenido proteico inducen un pH alcalino, que puede causar **alcalosis ruminal** si no es amortiguada por los ácidos orgánicos y la misma fermentación ruminal
- ✓ Los excesos de uno u otro tipo de alimento causan un cambio en la flora ruminal que altera el equilibrio y genera serios trastornos digestivos



- ✓ La evolución de los rumiantes les ha permitido utilizar en forma eficiente los alimentos fibrosos
- ✓ La adaptación anatómica de su sistema digestivo les permite utilizar la celulosa como fuente de energía
- ✓ No requieren fuentes externas de vitamina del complejo B y aminoácidos esenciales porque el rumiante lo obtiene de los microorganismos ruminales que los producen



- ✓ El ecosistema ruminal está formado por una amplia diversidad de microorganismos que se encuentran en una relación simbiótica en un ambiente anaeróbico estricto
- ✓ La mayoría de los microorganismos que se encuentran en el rumen son bacterias compuesta por una amplia gama de géneros bacterianos
- ✓ La competencia entre bacterias a nivel ruminal está determinada por la preferencia por ciertos sustratos, los requerimientos energéticos para el mantenimiento y la resistencia a ciertos productos del metabolismo que pueden resultar tóxicos



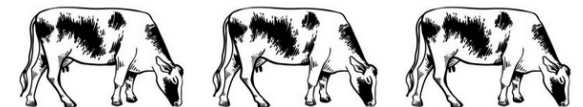
## Características de las principales bacterias ruminales

Tipo de bacterias	Gram stain	Productos de fermentación
<b>Bacterias que degradan la celulosa</b>		
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	Negativa	Succinato, Acetato, Formiato
<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	Negativa	Acetato, Formiato, Lactato, Butirato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<i>Ruminococci albus</i>	Positiva	Acetato, Formiato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<i>Clostridium lochheadii</i>	Positiva	Acetato, Formiato, Butirato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Bacterias amilolíticas</b>		
<i>Bacteriodes ruminicola</i>	Negativa	Formiato, acetato, succinato
<i>Ruminobacter amylophilus</i>	Negativa	Formiato, acetato, succinato
<i>Selenomonas ruminantium</i>	Negativa	Acetato, Propionato, Lactato
<i>Succinomonas amylofítica</i>	Negativa	Acetato, Propionato, Succinato
<i>Streptococci bovis</i>	Positiva	Lactato
<b>Bacterias lipolíticas</b>		
<i>Anaerovibrio lipolytica</i>	Negativa	Acetato, Propionato, Acetato
<b>Bacterias que degradan el lactato</b>		
<i>Selenomonas lactilytica</i>	Negativa	Acetato, Succinato
<i>Megasphaera elsdenii</i>	Positiva	Acetato, Propionato, Butirato, Valerato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Bacterias que degradan la pectina</b>		
<i>Lachnospira multiparus</i>	Positiva	Acetato, Formiato, Lactato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Arqueas ruminales (metanógenos)</b>		
<i>Methanobrevibacter ruminantium</i>	Positiva	CH <sub>4</sub> (de H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> o Formiato)
<i>Methanomicrobium mobile</i>	Negativa	CH <sub>4</sub> (de H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> o Formiato)
<b>Bacterias que utilizan ácido láctico</b>		
<i>Megasphaera elsdenii</i>	Negativa	Lactato

# **Bacterias que degradan la celulosa**

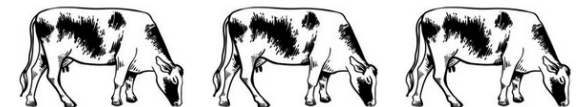
---

- ✓ La dieta de los rumiantes se basa en el consumo de especies vegetales donde el componente principal de la pared celular es la celulosa
- ✓ Los microorganismos ruminales celulolíticos digieren la celulosa en el rumen
- ✓ La capacidad de degradar la celulosa depende del tipo de forraje, estado de madurez de las plantas y componentes de las comunidades bacterianas celulolíticas

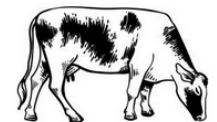




- ✓ Para asegurar el mantenimiento y crecimiento de las bacterias celulolíticas, se requieren que en el rumen existan condiciones óptimas entre las que se destaca la mantención de un pH neutro de entre 6 y 9. Con pH inferior a 5,5 se ve afectado la digestibilidad de la fibra
- ✓ Cambios en la temperatura ruminal afecta capacidad de adhesión de las bacterias a las partículas presentes en el rumen



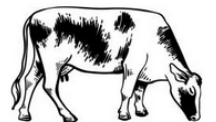
- ✓ La modificación de la temperatura ruminal también afecta la presencia de enzimas celulasas extracelulares que proporcionan azúcares que son usados por las bacterias celulolíticas
- ✓ La presencia de calcio ionizado ( $\text{Ca}^{+2}$ ) favorece el establecimiento de bacterias celulolíticas
- ✓ Los ácidos grasos de cadena media suelen afectar el desarrollo de las bacterias celulolíticas, lo que reduce la digestibilidad de la fibra



# **Bacterias que degradan el lactato**

---

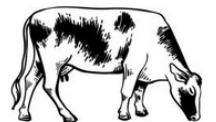
- ✓ Las bacterias que degradan el lactato a nivel ruminal cumplen un rol fundamental en aquellos rumiantes alimentados con cereales y concentrados
- ✓ Este tipo de bacterias metabolizan el ácido láctico y controlan su acumulación, lo que ayuda a mantener el pH ruminal
- ✓ El aumento de este tipo de bacterias se registra cuando la dieta posee aproximadamente un 70% de concentrado



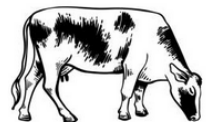
# **Bacterias que degradan la pectina**

---

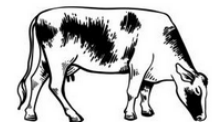
- ✓ Este tipo de bacterias son muy importantes dado que la pectina representa entre el 10% y 20% del total de los carbohidratos ubicados en los forrajes que son utilizados en la nutrición de rumiantes
- ✓ La pectina puede ser fermentada tanto por bacterias como por protozoos
- ✓ La acción de estas bacterias está relacionada con la producción y liberación de enzimas pectinolíticas al ambiente ruminal
- ✓ La pectinaliasas son las principales enzimas que hidrolizan la pectina en los oligogalacturónidos



- ✓ Los oligogalacturónidos consisten en una cadena lineal de moléculas de ácido galacturónico unida por enlaces  $\alpha$ -1-4
- ✓ Estas macromoléculas se localizan en la porción péctica que constituye la pared celular de las plantas y en condiciones naturales se liberan de la pectina mediante la acción de enzimas pécticas de la propia planta o proveniente de los microorganismos que invaden los tejidos vegetales como es lo que sucede a nivel ruminal



- ✓ En las plantas los oligogalacturónidos pueden regular la síntesis y acción de algunas hormonas, y distintos procesos de organogénesis y crecimiento en las plantas
- ✓ Los oligogalacturónidos pueden reducir los efectos provocados por metales pesados y contrarrestar algunos de los efectos negativos del estrés hídrico en las plantas
- ✓ Por sus funciones biológicas estas macromoléculas pueden considerarse adecuadas para crear nuevos bioestimulantes en beneficio de la agricultura

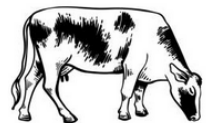




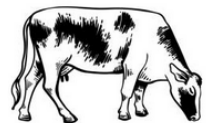
# **Arqueas ruminales o metanógenos**

---

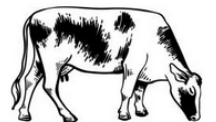
- ✓ Su presencia a nivel ruminal depende del crecimiento, mantenimiento y actividad de la población diversa de microorganismos
- ✓ La actividad microbiana es la principal fuente de gases de efecto invernadero en la agricultura, como el gas metano
- ✓ El metano es un producto final de la fermentación ruminal y se considera una pérdida de la energía total consumida por los rumiantes, representando entre el 6 y el 10% de la energía, lo que contribuye al efecto invernadero



- ✓ En los rumiantes, el 80% del metano se genera a partir de la fermentación de la fibra, principalmente celulosa
- ✓ La metanogénesis es un proceso necesario porque es una forma de mantener bajas concentraciones de  $H^+$  en el ambiente ruminal mediante la reducción de  $CO_2$
- ✓ Aunque el  $H^+$  es uno de los principales productos finales de la fermentación de bacterias, protozoos y hongos, no se acumula en el rumen porque es rápidamente utilizado por algunos microorganismos que forman parte del ecosistema



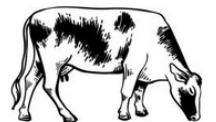
- ✓ La metanogénesis es el principal sumidero de eliminación de H<sup>+</sup>
- ✓ El metano es generado por bacterias metanogénicas que utilizan dióxido de carbono e
- ✓ Los metanógenos pertenecen al dominio Archaea y no sólo utilizan el CO<sub>2</sub> para producir CH<sub>4</sub>, sino que también pueden degradar sustratos que contienen grupos metilo (CH<sub>3</sub><sup>-</sup>) o acetilo (CH<sub>3</sub>CO<sup>-</sup>), como son el metanol y el acetato



# **Bacterias proteolíticas**

---

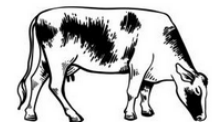
- ✓ En el rumen, las proteínas del forraje y los polisacáridos estructurales se degradan entre un 50% y 70% por acción de los microorganismos
- ✓ La proteólisis ruminal se realiza mediante la producción enzimática de microorganismos ruminales por procesos de hidrólisis de proteínas, degradación de péptidos y desaminación de aminoácidos



# **Bacterias lipolíticas**

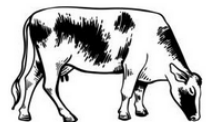
---

- ✓ Los lípidos se modifican mediante la fermentación microbiana
- ✓ Los ácidos grasos insaturados presentes en el alimento se transforman en ácidos grasos saturados en el rumen
- ✓ Los microorganismos ruminales transforman los lípidos a través de dos vías: lipólisis y biohidrogenación
- ✓ Los principales tipos de lípidos que consumen los rumiantes en sus dietas son los triglicéridos, los fosfolípidos y los galactolípidos
- ✓ Los galactolípidos son un tipo de glicolípido cuyo grupo de azúcares es la galactosa y se diferencian de los glicoesfingolípidos en que no tienen nitrógeno en su composición

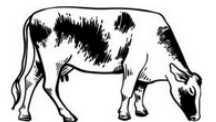




- ✓ Los lípidos del rumen son hidrolizados primero por lipasas microbianas
- ✓ Las lipasas rompen los enlaces éster y liberan ácidos grasos
- ✓ Posterior a la lipólisis, los ácidos grasos insaturados se biohidrogenan por la presencia de  $H^+$  producido por los microorganismos ruminales
- ✓ La tasa de lipólisis está relacionada con el tipo de lípidos que posee la ración y el pH ruminal



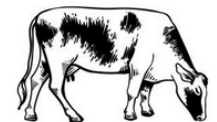
- ✓ A medida que disminuye el pH del rumen ( $< 6.0$ ) se ralentiza la lipólisis
- ✓ Esto determina que la lipólisis depende del tipo de sustratos fermentable de la dieta
- ✓ La actividad de las bacterias lipolíticas disminuye en dietas con alto contenido de alimentos concentrados



# **Bacterias degradadoras del lactato**

---

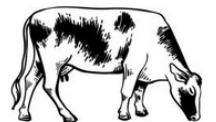
- ✓ El lactato es un metabolito de la glucosa que corresponde a un producto intermediario de la fermentación ruminal, que se metaboliza a AGV
- ✓ *Megasphaera elsdenii* es la principal especie de bacteria responsable de la metabolización del ácido láctico la cual cumple un rol importante en la prevención de la acidosis durante el período de adaptación cuando los rumiantes son alimentados con dietas altas en concentrado
- ✓ En dietas ricas en almidón este tipo de bacterias aumenta a nivel ruminal



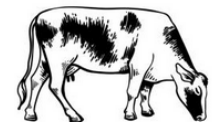
# Protozoos en el rumen

---

- ✓ Casi todos los protozoos presentes en el rumen de los animales adultos son especies ciliadas
- ✓ En los animales jóvenes normalmente se encuentran especies de protozoos flagelados antes que se establezcan los ciliados
- ✓ Los requerimientos de los protozoos son difíciles de establecer dado que algunos incluso se alimentan de bacterias
- ✓ Los protozoos en el ecosistema ruminal cumplen diversas funciones entre las que se encuentra la degradación de las proteínas y de la celulosa de la dieta que consumen diariamente los animales rumiantes



- ✓ Los protozoos de mayor importancia ubicados a nivel ruminal son aquellos de las ordenes *Entodiniomorphida* y *Holotricha*
- ✓ El flujo de protozoos ruminales al abomaso de los rumiantes es menor que el de bacterias, ya que quedan retenidos en las partículas del alimento
- ✓ Los holotricos corresponde a un grupo de protozoos ciliados que son capaces de asimilar azúcares solubles y mantener algunos de ellos en polisacáridos de reserva
- ✓ Este tipo de protozoos poseen la importancia de disminuir el riesgo de acidosis ruminal producto del consumo de dietas con altas concentraciones de azúcares de fácil

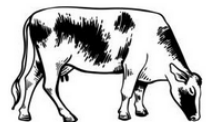


# Tipos de Protozoos

---



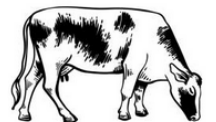
- ✓ La mayoría de los protozoos (90%) pertenecen al género *Entodiniomorphida*, entre los cuales muchos participan en la hidrólisis y fermentación de la celulosa (protozoos **celulolíticos**)
- ✓ Otros protozoos tienen actividad **amilolítica** debido a su capacidad para producir enzimas amilolíticas
- ✓ En el ambiente ruminal también existen protozoos **proteolíticos** que degradan las proteínas solubles
- ✓ La mayoría de las proteínas las degradan las bacterias dado que su actividad es 6 a 10 veces mayor que la de los protozoos



# Hongos ruminales

---

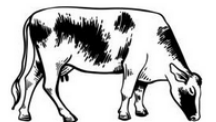
- ✓ Los hongos representan una pequeña proporción (<85) de la biomasa en el ecosistema ruminal
- ✓ Algunos hongos son micro aerotolerantes y están adheridos a las partículas de alimento a través de un sistema de rizoides
- ✓ Las poblaciones de hongos ruminales aumentan con el consumo de forrajes fibrosos altamente lignificados
- ✓ Los hongos ruminales están presentes en el duodeno, el ciego y las heces y se eliminan cuando los rumiantes se alimentan con altas concentraciones de azúcares rápidamente fermentables
- ✓ Los hongos proliferan en forma rápida cuando se aumenta la concentración del alimento



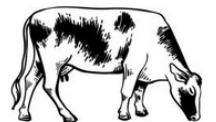
# Hongos celulolíticos

---

- ✓ Los hongos ruminales tienen la capacidad de producir enzimas que hidrolizan la celulosa y los xilanos (polisacáridos más abundantes después de la celulosa)
- ✓ La actividad enzimática de los hongos es variable y depende de su origen filogenético y estructura rizoide (equivalente a la raíz de las plantas)
- ✓ Existen especies de hongos capaces de ser más eficientes que las bacterias en la digestión polisacáridos estructurales
- ✓ La actividad fúngica ayuda a la digestión ruminal de la pared celular de los vegetales



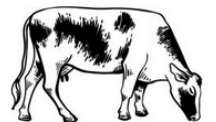
- ✓ La producción de zoosporas por quimiotaxis (movimiento hacia el alimento) permite la rápida adhesión de éstas a las partículas de alimentos
- ✓ Los hongos fracturan zonas de tejidos lignificados por acción mecánica y los tejidos vegetales no lignificados se degradan rápidamente
- ✓ Los hongos ruminales son particularmente importantes cuando el rumiante consume sustratos lignificados
- ✓ Existen hongos que tienen la capacidad de solubilizar pequeñas fracciones de lignina de la pared celular de la planta



# **Modificación de las dietas**

---

- ✓ Cambios en la composición de las dietas de los animales puede modificar el perfil de fermentación microbiana de un rumiante
- ✓ La inclusión de leguminosas en la ración de los rumiantes puede resultar positivo para la actividad microbiana del rumen y los productos finales de la fermentación dado que constituyen una buena fuente de proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales que son un adecuado sustrato para los microorganismos celulolíticos
- ✓ Forrajes de bajo valor nutricional con alto contenido de lignocelulosa, baja concentración de azúcares fermentables y proteínas de baja calidad afectan la actividad microbiana y el perfil de los productos de fermentación

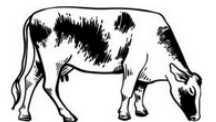




# **Uso de productos con actividad ruminal**

---

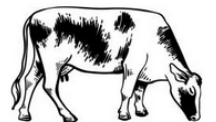
- ✓ Los productos o sustancias con actividad ruminal están referidos a los suplementos o aditivos que se incluyen en las dietas de los animales con el objetivo de potenciar los procesos de fermentación que tienen lugar en el rumen y así alcanzar una mayor eficiencia de uso de los alimentos consumidos por los rumiantes
- ✓ Entre los productos más utilizados se encuentran los suplementos nitrogenados, las sustancias taponadoras del pH, ionóforos y sebo o grasa animal



# **Suplementos nitrogenados**

---

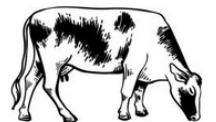
- ✓ El uso de nitrógeno no proteico como la urea es una estrategia que permite cubrir esta necesidad, pero su eficiencia es menor cuando el animal se suplementa con forrajes de baja calidad
- ✓ La suplementación con proteína cruda a rumiantes mejora la digestibilidad de la fibra por el aumento de la población de bacterias celulolíticas
- ✓ La entrega diaria de un suplemento proteico a los animales que pastorean pasturas de baja calidad aumenta el peso corporal y disminuye el tiempo de pastoreo
- ✓ Existe una sinergia entre la suplementación con proteínas y azúcar debido a que aumenta la síntesis microbiana de proteína a diferencia cuando se entregan por separado



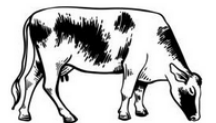
# **Sustancias taponadoras del pH (buffer)**

---

- ✓ Los altos niveles de propionato a expensas del acetato se asocian a las raciones de engorda con alto aporte de concentrados
- ✓ La acumulación excesiva de ácido láctico en dietas con alta proporción de concentrados puede producir la caída del pH ruminal
- ✓ El uso de compuestos tampón del pH permiten mantener el pH ruminal necesario para proporcionar una buena actividad microbiana



- ✓ Para mantener el pH a niveles correctos en el rumen se utilizan sales minerales como carbonatos, bicarbonatos y fosfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio
- ✓ Estos compuestos mantienen un pH constante y promueven la población de bacterias celulolíticas, aumentando así la digestibilidad de la materia seca y la síntesis de proteínas y previniendo la acidosis ruminal

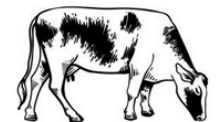


**Ionóforos**

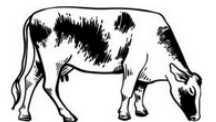
---



- ✓ Los ionóforos son antibióticos poliéter carboxílicos, que se utilizaron como agentes anti coccidiales en las aves de corral
- ✓ Son compuestos producidos por diversas cepas de *Streptomyces* e incluyen monensina, lasalocid, salinomycin y narasin. Todos estos compuestos se utilizan como promotores del crecimiento
- ✓ Desde 2006 en Europa es prohibido el uso de monensina dado que es un antibiótico producido a partir del hongo *Streptomyces canelaensis* que actúa sobre las bacterias gram +
- ✓ La monensina se une a la membrana celular de estas bacterias, provocando un intercambio iónico de protones monovalentes, una disminución de la acumulación intracelular de  $K^+$  y  $Na^+$  y una pérdida de energía celular



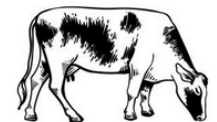
- ✓ Los ionóforos se pueden utilizar en rumiantes para disminuir el riesgo de meteorismo, dado reduce la producción de metano a través del control de las bacterias productoras de H<sup>+</sup>
- ✓ En rumiantes alimentados con dietas altas en concentrados, los ionóforos reducen el consumo de alimento y mejoran el aumento de peso de los animales
- ✓ En dietas que contienen concentraciones significativas de celulosa (forrajes) los ionóforos no reducen el consumo y mejoran la ganancia de peso, mejorando la conversión alimenticia en ambos casos



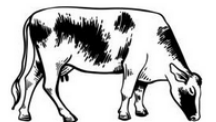
**Grasa o sebo**

---

- ✓ La grasa animal o sebo es un producto de bajo costo que se utiliza en las dietas de los rumiantes para aumentar la densidad energética de la dieta de los rumiantes y con ello la eficiencia metabólica del ganado
- ✓ Se ha demostrado que el sebo o grasa no afecta negativamente la fermentación ruminal, la digestibilidad de los nutrientes, el consumo de materia seca o la producción de leche cuando se suplementa en las cantidades de entre el 2 % y 3% de la materia seca
- ✓ Otro efecto importante de la suplementación con grasas es un mejor desarrollo reproductivo y un menor riesgo de trastornos metabólicos en los animales , debido a la eliminación del uso de grasa de las reservas corporales



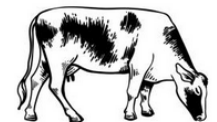
- ✓ El exceso de sebo en la dieta (>3% base materia seca) se ha asociado con la disminución de la palatabilidad y digestibilidad de la fibra producto de una reducción de los ácidos grasos de cadena larga disponibles para las bacterias del rumen
- ✓ Pequeños incrementos de grasa pueden mejorar el crecimiento bacteriano al incorporar los ácidos grasos de la dieta y reducir la necesidad de sintetizarlos
- ✓ En las engordas de novillos con suplementos de sebo causa una disminución de las poblaciones de protozoos ciliados



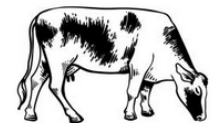
# Bioquímica del rumen

---

- ✓ Los procesos de biotransformación en el rumen se generan a partir de la actividad biológica fermentativa de los microorganismos presentes en la microflora ruminal
- ✓ Uno de esos bioprocesos corresponde a la **digestión de los azúcares** que se realiza en el rumen a partir de la hidrólisis de los carbohidratos, realizada por las bacterias ruminales, que producen ácidos grasos volátiles (AGV): acético, propiónico y butírico, que constituyen la principal fuente de energía utilizada por los rumiantes
- ✓ Los polisacáridos más importantes en el rumen son: celulosa, hemicelulosa, almidones, pectina y lignina, algunos azúcares simples como los disacáridos maltosa y celobiosa, que son productos intermedios de la hidrólisis de azúcares complejos

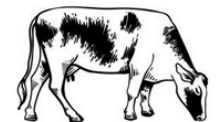


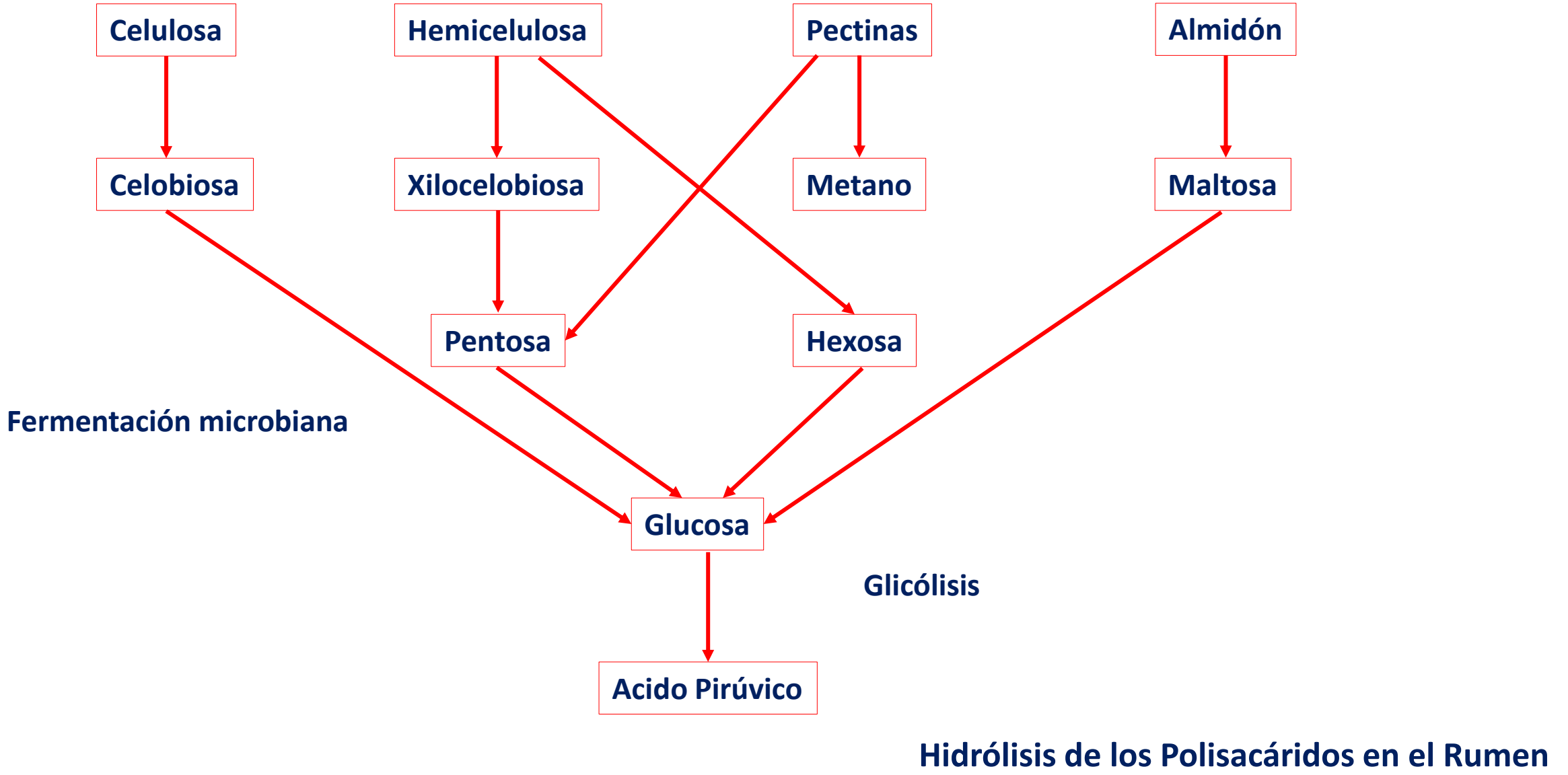
- ✓ La **digestión de la celulosa** es uno de los principales bioprocesos microbianos que ocurren en el rumen
- ✓ La hidrólisis de la celulosa se genera a partir de la enzima bacteriana celulasa, cuya acción disminuye cuando la dieta es rica en almidón, azúcares simples y otros azúcares solubles
- ✓ El producto final de la hidrólisis de la celulosa es el ácido acético, pero también pueden producirse en forma indirecta ácido propiónico y ácido butírico



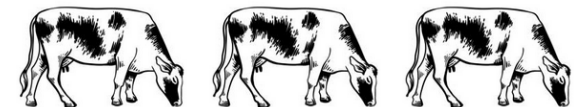


- ✓ La **digestión del almidón** se produce a través de amilasa generada por las bacterias y su producto final es el ácido propiónico, aunque también suele producirse ácido láctico y algunos sacáridos de cadena larga
- ✓ En dietas proporcionadas a los rumiantes con alto contenido de almidón se produce la acidez ruminal generada por la síntesis elevada de ácido láctico

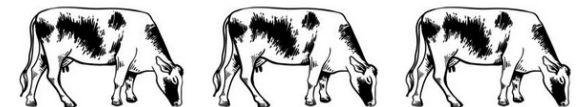




- ✓ La **digestión de las pectinas** se realiza a partir de las bacterias productoras de pectinesterasas que desdoblan las pectinas a metanol y ácido galacturónico, que se convierten en metano y pentosas
- ✓ Por la vía colateral de las pentosas se transforman en fructuosa, que ingresa al ciclo de Krebs y produce una fuente importante de energía



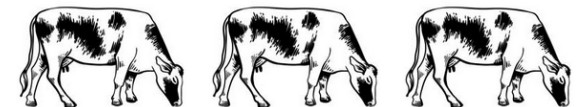
- ✓ La **digestión de los azúcares simples**, que corresponde a formas intermedias de la digestión de almidones, azúcares complejos u otros polisacáridos se realiza a partir de las productoras de disacaridasas que producen ácido propiónico
- ✓ Los azucares simples pueden estar presentes formas complejas o individual

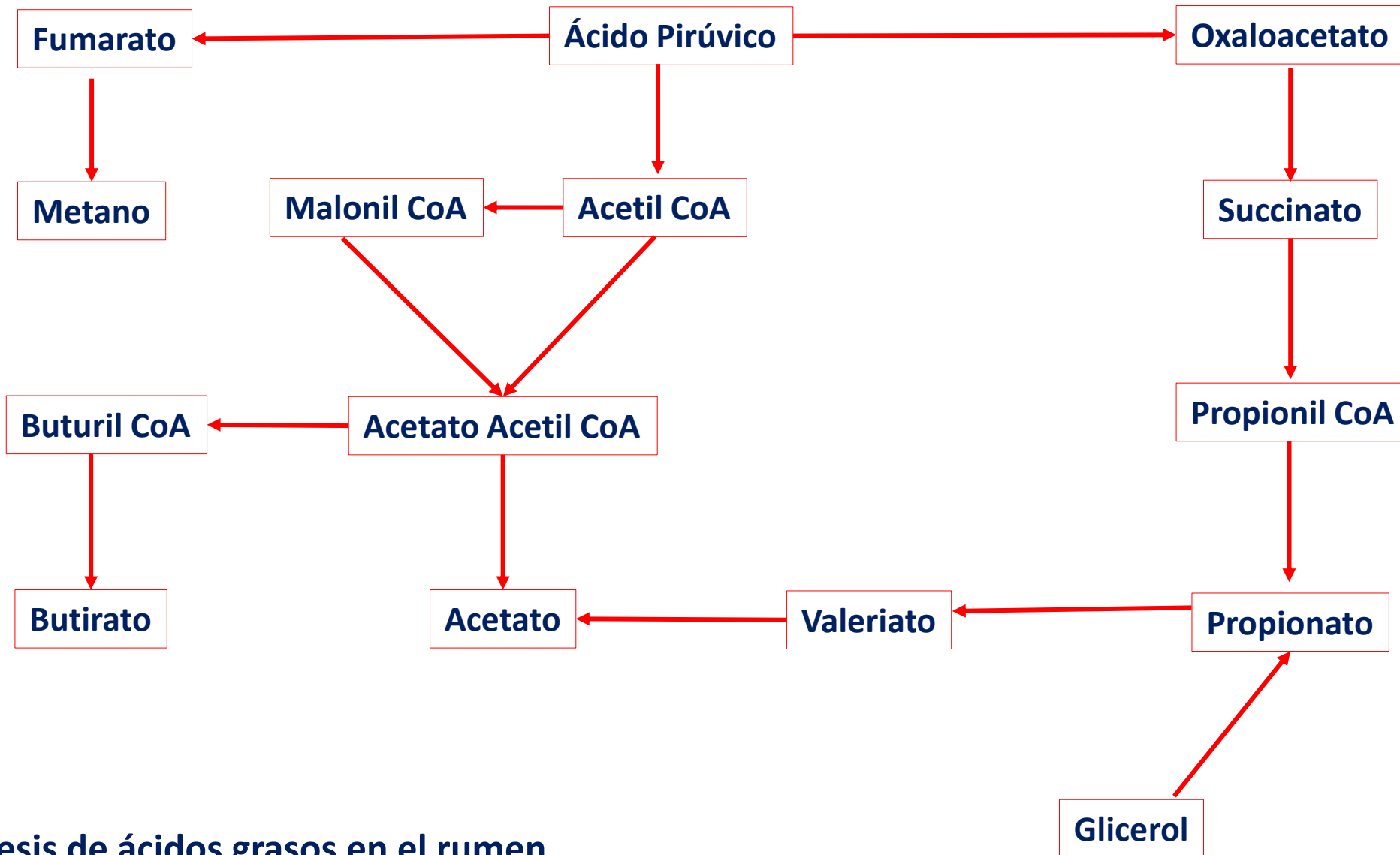


# Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

---

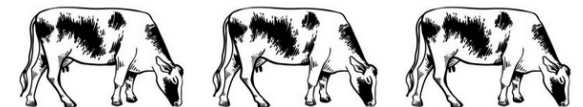
- ✓ La síntesis de ácidos grasos volátiles es un proceso bioquímico que comienza con la síntesis de glucosa a partir de los carbohidratos como celulosa, hemicelulosa, almidones y pectinas
- ✓ Los carbohidratos mediante la acción de enzimas bacterianas son desdoblados a azúcares simples
- ✓ La glucosa, mediante la Glucólisis, proporciona como resultado final la formación de ácido láctico y ácido pirúvico que, mediante el proceso de hidrogenación, da como resultado la síntesis de los tres ácidos grasos volátiles: acético, propiónico y butírico





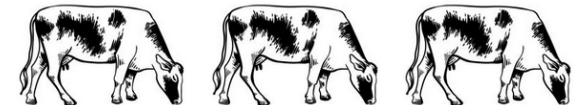
Síntesis de ácidos grasos en el rumen

- ✓ El **ácido acético** predomina cuando la dieta está basada en forrajes, pero también es el principal AGV, formado a partir de proteínas y grasas
- ✓ El **ácido propiónico** aumenta con dietas ricas en almidón y azúcares simples y constituye la fuente más importante de energía para el bovino. A partir de lactato se sintetiza principalmente ácido propiónico y parcialmente ácido butírico
- ✓ El **ácido butírico** es producido durante la fermentación de lactato y de azúcares simples. Su proporción aumenta cuando se adiciona melaza a la dieta y como derivado de la beta oxidación, al usarse las grasas como fuente de energía

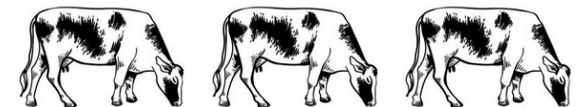




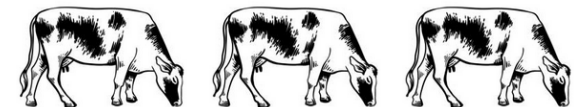
- ✓ En los rumiantes la mayor parte de la energía que utilizan proviene de los carbohidratos que consumen en la dieta, los que son degradados a glucosa por los microorganismos del rumen
- ✓ La glucosa es un producto intermediario para la formación de AGV que son absorbidos a través de la pared ruminal
- ✓ Las cantidades de carbohidratos que llegan al intestino delgado de los rumiantes es muy pequeña y habitualmente son células de origen microbiano componentes de la pared celular y polisacáridos de origen protozoario
- ✓ Es por esta razón que en rumiantes no se presentan niveles altos de glucosa en la sangre (hiperglicemia)



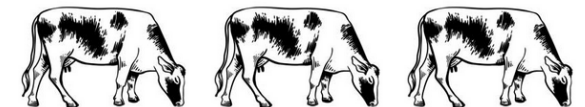
- ✓ Los carbohidratos de los forrajes están formados por celulosa, hemicelulosa, almidón, azúcares como glucosa, fructosa y sucrosa y polisacáridos
- ✓ Con el avance en el estado fenológico de las plantas (maduración del pasto) la proporción de celulosa aumenta y la de almidón y azúcares disminuye
- ✓ La velocidad de degradación de los carbohidratos a nivel ruminal está relacionada directamente por la solubilidad, donde celulosa y hemicelulosa son los que más demoran debido a su estrecha relación con la lignina, componente estructural, completamente indigestible y que no es un carbohidrato



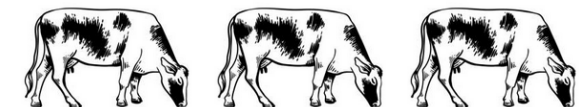
- ✓ **Celulosa:** Polisacárido estructural en las plantas que es la principal fuente de energía de los rumiantes y consiste en un conjunto de unidades de glucosa (monómeros)
- ✓ Los monómeros son convertidos a través del metabolismo microbiano ruminal a AGV (ácidos grasos volátiles de cadena corta)
- ✓ Entre los AGV de mayor importancia se encuentran el acético, propiónico y butírico que aportan entre el 70 y 80% del total de la energía disponible para el animal
- ✓ Los AGV son absorbidos a través de la pared ruminal desde donde pasan al torrente sanguíneo y utilizados en forma directa como fuente de energía



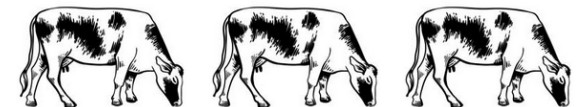
- ✓ La enzima que degrada la celulosa es la **celulasa** que es de origen microbiano, extracelular, pero unida a la pared celular
- ✓ Las fibras de celulosa son digeridas por las bacterias que las colonizan en el rumen erosionando cavidades que posteriormente son colonizadas por otras bacterias no necesariamente de tipo celulolíticas
- ✓ La ingestión de carbohidratos de rápida utilización como son los azúcares y el almidón se produce un cambio en la población microbiana del rumen donde dominan los microorganismos no celulíticos reduciéndose la capacidad de degradación de la celulosa

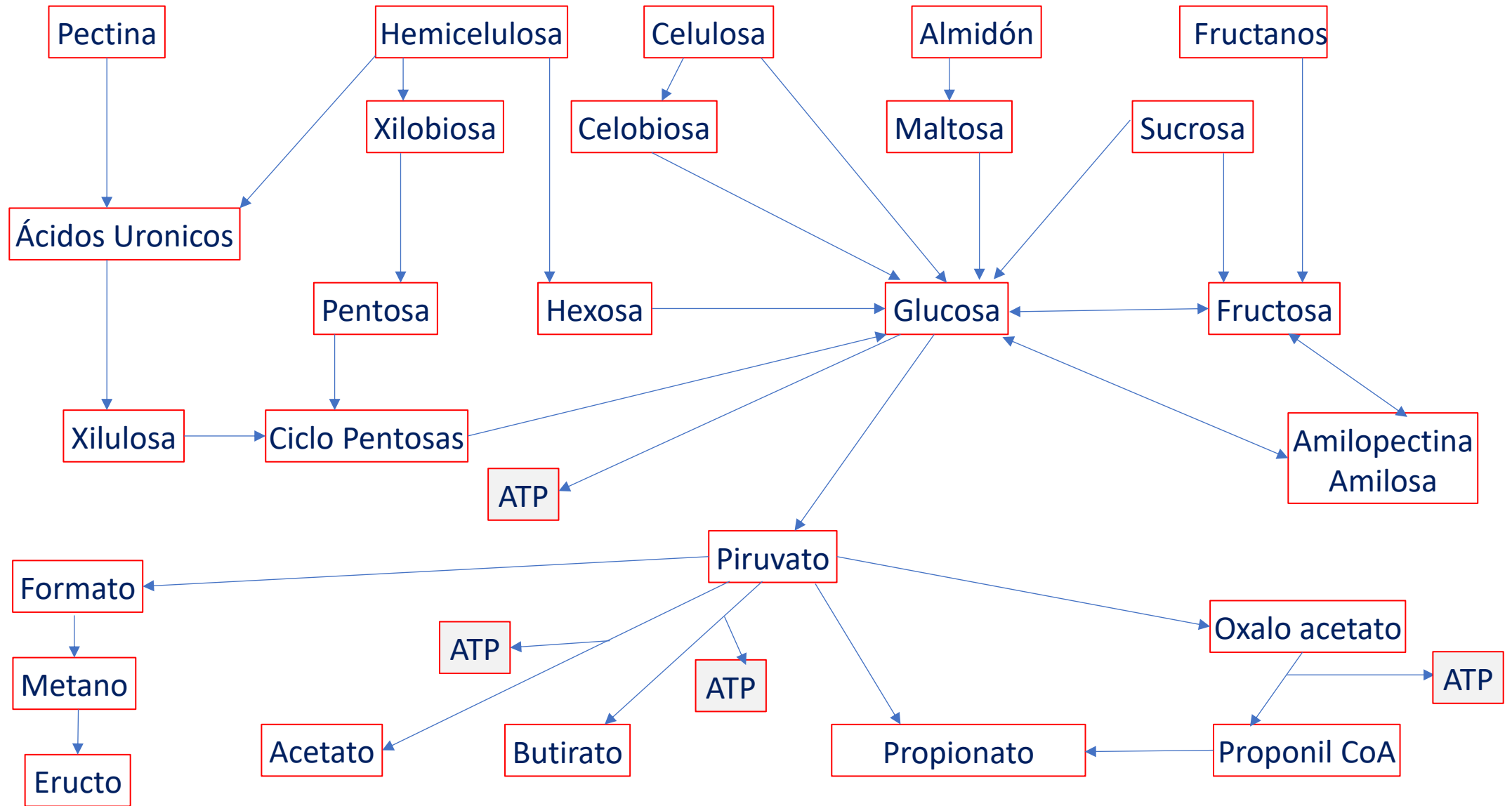


- ✓ **Almidón:** Corresponde a una mezcla de dos polisacáridos, amilosa y amilopectina, formados por unidades de glucosa
- ✓ El almidón nunca alcanza a llegar al intestino delgado de los animales dado que es degradado en forma rápida en el rumen a AGV
- ✓ La forma rápida que conduce a la formación de un AGV es la siguiente:



- ✓ **Azúcares:** Estos productos son de rápida degradación ruminal en que una parte es destinada para la producción de energía necesaria para el crecimiento microbiana y otra convertido en polisacáridos de almacenamiento como es la amilopectina
- ✓ La velocidad de fermentación de los azúcares es variable. De forma rápida de desgrada la glucosa y la fructosa y en forma lenta la maltosa, galactosa y lactosa
- ✓ Al igual que en el almidón la ingestión de estos azúcares reduce la digestibilidad de la celulosa
- ✓ La fermentación de azúcares también produce AGV cambiando su proporción, aumenta el ácido propiónico y disminuye el acético





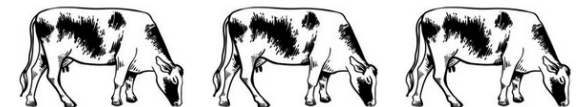
Rutas metabólicas que conducen a la formación de los principales productos de la fermentación de carbohidratos en el rumen

# **Digestión de proteínas en el rumen**

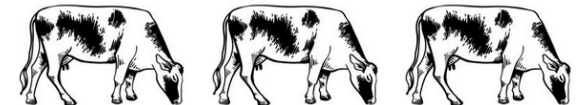
---



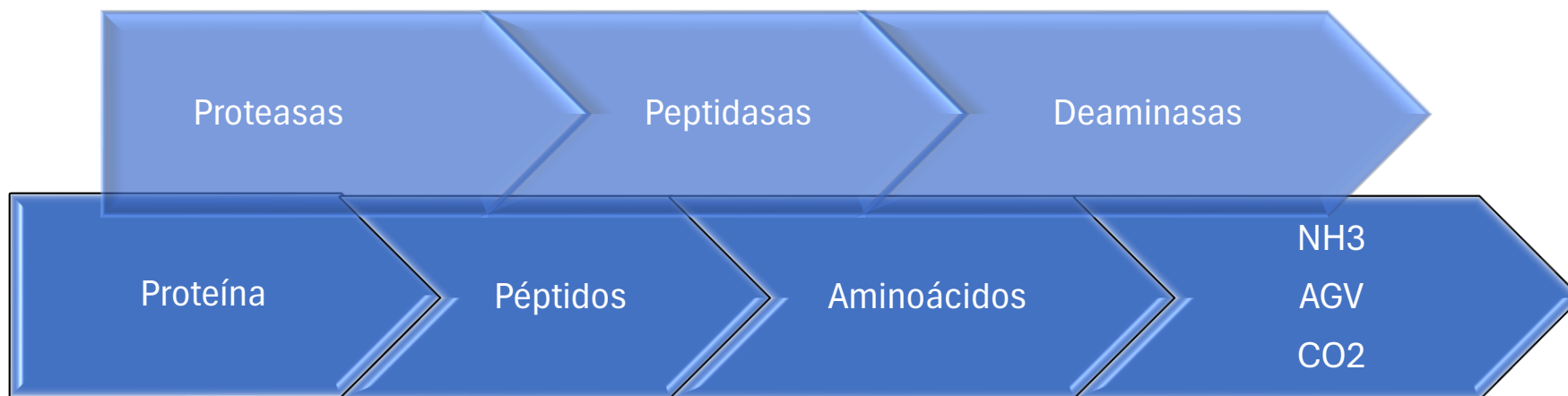
- ✓ En los rumiantes la mayor parte de los requerimientos de nitrógeno son cubiertos a través de la proteína microbiana (bacterias y protozoos) que se degrada a aminoácidos
- ✓ La composición aminoacídica del rumen es notablemente constante
- ✓ Por esta razón es que el valor de una dieta en rumiantes es lograr la máxima capacidad de producir crecimiento microbiano y por tanto máxima producción de proteína microbiana
- ✓ Los requerimientos de aminoácidos de los rumiantes pueden ser satisfechos por dietas que no contienen proteína preformada debido a la síntesis proteica que ocurre en los microorganismos del rumen



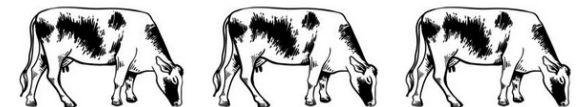
- ✓ El principal sustrato nitrogenado de los microorganismos del rumen es el  $\text{NH}_3$  que al mismo tiempo el principal producto final de degradación microbiana de la proteína y del nitrógeno no proteico (NNP)
- ✓ El  $\text{NH}_3$  es el metabolito central del metabolismo del nitrógeno en el rumen donde existen diversas bacterias que en forma parcial o absoluta lo utilizan como fuente de nitrógeno
- ✓ Las proteínas que ingresan al rumen son secuencialmente degradadas por las enzimas proteasas (no son específicas), peptidasas y deaminasas



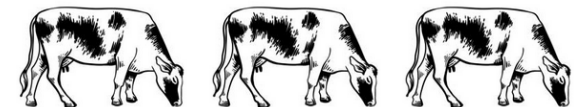
✓ La reacción general que conduce a la formación de  $\text{NH}_3$ , AGV y  $\text{CO}_2$  es la siguiente:



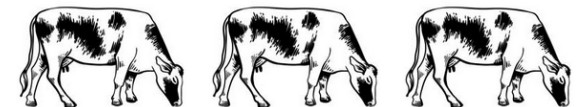
- ✓ En la producción de AGV a partir de las proteínas no existe liberación de ATP
- ✓ El NNP que es principalmente urea es hidrolizado en forma rápida a nivel ruminal a través de la ureasa bacteriana y transformado en  $\text{NH}_3$  que es asimilado por las bacterias para la síntesis proteica
- ✓ El exceso de  $\text{NH}_3$  es absorbido a través de las paredes del rumen y a través del flujo sanguíneo llega al abomaso donde será absorbido
- ✓ La acumulación excesiva de  $\text{NH}_3$  a nivel ruminal puede inhibir la motilidad ruminal y pasar al torrente sanguíneo generando efectos tóxicos en los animales



- ✓ El  $\text{NH}_3$  absorbido es transportado al hígado y transformado en urea
- ✓ El  $\text{NH}_3$  y la urea no son utilizados para la formación de aminoácidos esenciales en el animal
- ✓ La urea producida en el hígado tiene tres destinos posibles:
  - Excreción vía riñón
  - Recirculado al rumen a través de la saliva
  - Recirculado directamente al rumen por difusión a través de la pared ruminal

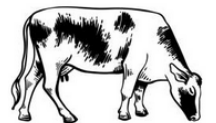


- ✓ La urea que es recircula ala rumen pude ser nuevamente utilizada para sintetizas proteína bacteriana lo que aumenta la eficiencia de uso, en especial, en dietas con bajo aporte de proteína
- ✓ La excreción de nitrógeno a través de la urea se puede reducir incrementando el nivel energético de la dieta (carbohidratos) para lograr una mayor asimilación del  $\text{NH}_3$  por los microorganismos
- ✓ La presencia de carbohidratos no solo permite aumentar síntesis de proteína a nivel ruminal, sino que también mejora la degradación de la celulosa

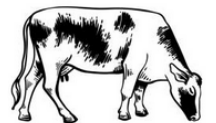


✓ A nivel ruminal la digestión de compuestos nitrogenados se produce en dos etapas:

- Fermentación de enzimas proteolíticas bacterianas sobre proteínas y nitrógeno no proteico
- Desdoblamiento de las proteínas y péptidos por acción de las enzimas del abomaso

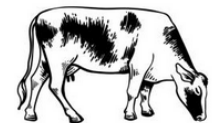


- ✓ Las principales fuentes de abastecimiento de nitrógeno en el rumiante son las siguientes:
  - Proteína verdadera que corresponde a la que proviene del alimento
  - Proteína microbiana que es formada por síntesis bacteriana
  - Nitrógeno no proteico constituido por urea, amonio nitratos y nitritos
  - Productos de la descamación del epitelio ruminal
  - Degradación de las bacterias y protozoos ruminales

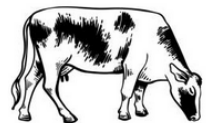




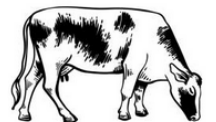
- ✓ La degradación de la proteína a nivel ruminal se inicia con la acción de las enzimas bacterianas extracelulares y la fagocitosis de los protozoarios que proporciona péptidos libres y proteínas formadas a partir de síntesis microbiana
- ✓ Las proteínas que escapan a la digestión microbiana son denominadas **proteínas de sobrepaso** y son digeridas en el abomaso y duodeno

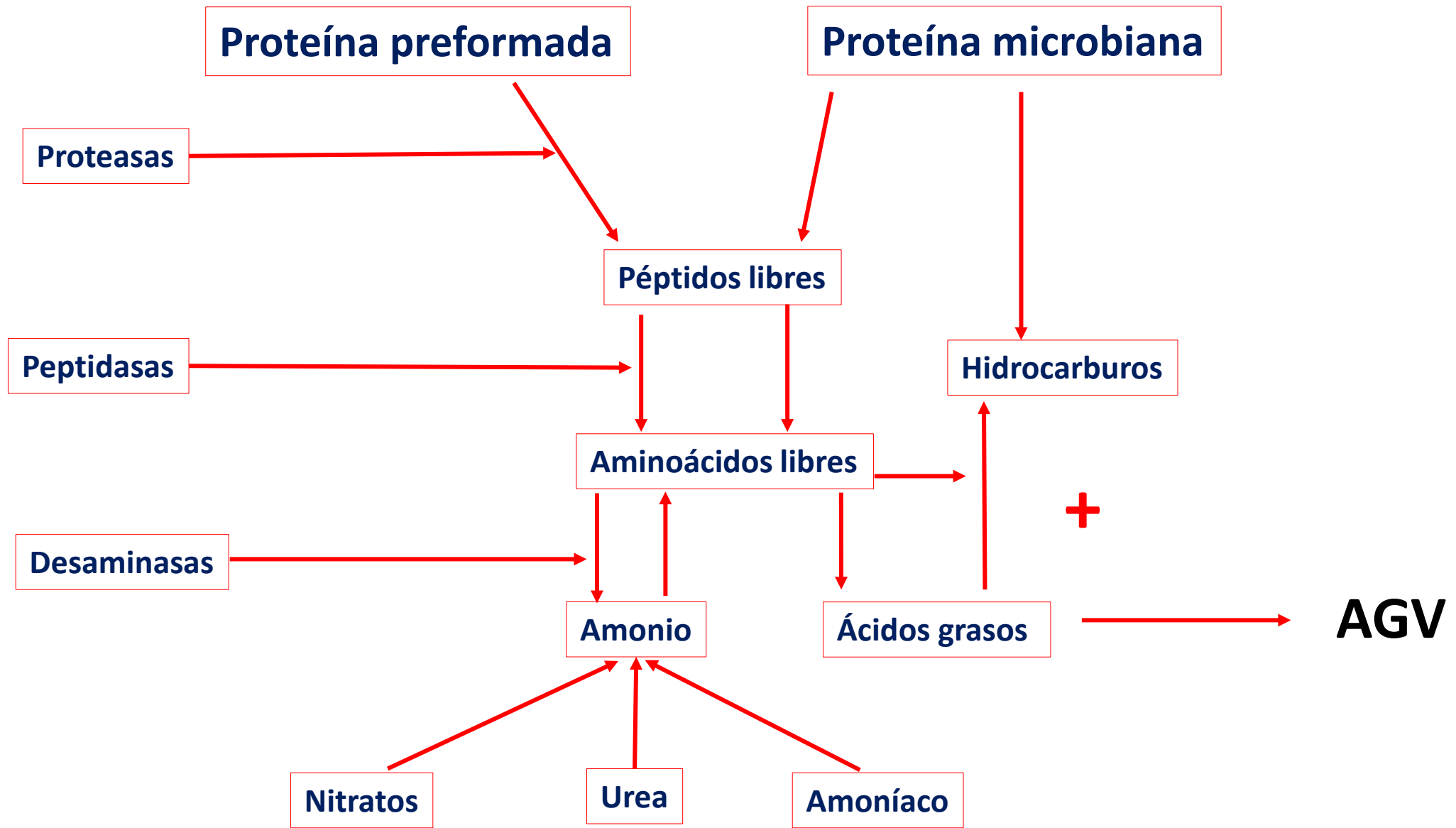


- ✓ La transformación de las proteínas y el nitrógeno no proteico se divide en:
  - Degradación de sustancias nitrogenadas hasta amoniaco y ácidos grasos
  - Utilización del amoniaco y cadenas de hidrocarburos para sintetizar nuevos aminoácidos y nuevas proteínas



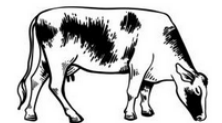
- ✓ La degradación de la proteína se da en tres etapas de digestión:
- Proteólisis realizada por las enzimas microbianas cuyo resultado es la formación de péptidos libres.
  - Por acción de peptidasas, los péptidos de cadena corta son degradados produciendo aminoácidos libres.
  - Las desaminasas hidrolizan a los aminoácidos y el resultado final es amoniaco, cetoácidos, hidroxiaácidos y ácidos grasos





Digestión de proteínas en el rumen

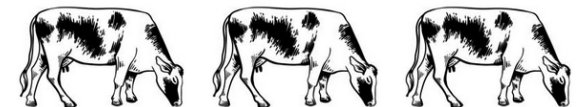
- ✓ Péptidos y aminoácidos pueden seguir la ruta de desdoblamiento microbiano o bien ser utilizados en la síntesis de proteína microbiana
- ✓ La síntesis de proteína microbiana se genera tanto por las bacterias como por los protozoos para lo cual se requiere una alta proporción de carbohidratos para su síntesis



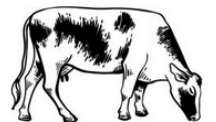
# **Hidrólisis ruminal de los lípidos**

---

- ✓ La actividad microbiana sobre las grasas en el rumen se resume en tres funciones principales: hidrólisis, hidrogenación y fermentación
- ✓ **Hidrólisis:** Los microorganismos ruminales hidrolizan los enlaces esterificados entre el glicerol y ácidos grasos
- ✓ **Hidrogenación:** Para esta función se utiliza el H<sub>2</sub> producido en el metabolismo del ácido fórmico como fuente de hidrogeno. Los ácidos grasos saturados son absorbidos mas tarde en el intestino delgado
- ✓ **Fermentación:** Como ejemplo de esta función se puede mencionar que la fermentación del glicerol produce ácido propiónico, láctico y succinico

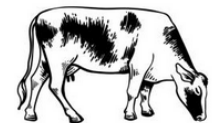


- ✓ Los lípidos presentes a nivel ruminal corresponden a ácidos grasos insaturados provenientes del alimento energético junto con los triglicéridos y otros compuestos lípidos estructurales, formados a partir de la degradación de la membrana celular microbiana
- ✓ Los lípidos son degradados por lipasas microbianas y son desdoblados hasta ácidos grasos y glicerol
- ✓ Los triglicéridos son degradados por estererasas y lipasas bacterianas presentes en el líquido ruminal

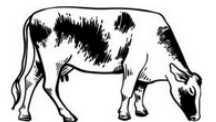




- ✓ Los ácidos grasos libres de cadena corta son absorbidos en forma directa en la pared ruminal y los ácidos grasos de cadena larga son utilizados por los microorganismos del rumen para la síntesis de lípidos estructurales o pasan directo a los otros compartimentos gástricos
- ✓ Los ácidos grasos insaturados, son hidrogenados para formar glicerol que es metabolizado por la enzima glicerolcínasa para la síntesis de ácido propiónico



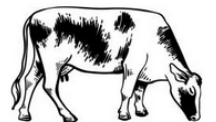
- ✓ La hidrogenación ocurre con mayor velocidad en ácidos grasos libres. En los ácidos grasos monoinsaturados ocurre más lentamente
- ✓ Con la hidrogenación se facilita el crecimiento bacteriano debido a que los ácidos grasos insaturados, alteran la permeabilidad de la membrana microbiana, inhibiendo su desarrollo
- ✓ Con la hidrogenación se reduce la formación de metano, se le proporciona mayor utilidad al  $\text{CO}_2$  y con ello aumenta la energía disponible



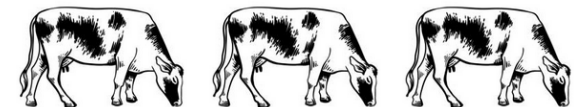
# **Síntesis de vitaminas en el rumen**

---

- ✓ El rumiante adulto puede prescindir de vitaminas hidrosolubles y vitamina K dada la síntesis que realizan los microorganismos ruminales
- ✓ Las principales vitaminas que se sintetizan en el rumen son; Tiamina, Riboflavina, Piridoxina, Niacina, Acido Pantoténico, Ácido Fólico, Acido Lipoico y Cianocobalamina
- ✓ Para a síntesis de Cianocobalamina el animal requiere de una adecuada disponibilidad de Cobalto a partir del cual las bacterias pueden sintetizarla



- ✓ En rumiantes jóvenes con un rumen en formación la síntesis de vitaminas es ineficiente o no se verifica situación que implica su suplementación adecuada
- ✓ Junto con la ventaja que poseen los rumiantes de prescindir de las vitaminas del complejo B y vitamina K existe la desventaja de que las vitaminas liposolubles A y E son degradadas por los microorganismos ruminales
- ✓ Esta degradación puede alcanzar en algunos casos hasta el 50% de lo disponible en la dieta



# Fisiología digestiva en rumiantes

Rolando Demanet Filippi  
Dr. Ingeniero Agrónomo  
Facultada de Ciencias Agropecuarias y Medio Ambiente  
Universidad de la Frontera

Cátedra de Producción de Carne  
2024