

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

FACTORES QUE AFECTAN LA UTILIZACIÓN RUMINAL DEL GRANO DE SORGO EN VACUNOS

Factors affecting ruminal utilization of sorghum grain in cattle

MONTIEL¹, M.D. Y ELIZALDE², J.C.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce.

1. Introducción
2. Constitución y composición de los granos de sorgo
3. Interacción almidón-proteína en granos de sorgo
4. Efecto del genotipo
5. Efecto del contenido de taninos
6. Efecto del procesamiento
7. Conclusiones
8. Bibliografía

RESUMEN

En la presente revisión se evalúan los diferentes factores que afectan la utilización del grano de sorgo a nivel ruminal en vacunos. La composición química de los mismos así como la estructura del endosperma determinan el grado de utilización del grano en el rumen. En el grano de sorgo existen varios tipos de proteínas que poseen diferentes propiedades físicas, actividad biológica y calidad nutricional. La naturaleza y la composición química de la matriz proteica del endosperma imprimen características físicas al mismo que condicionan la exposición de los gránulos de almidón a la digestión enzimática. Por otra parte, el genotipo, la presencia de taninos condensados y el nivel de procesamiento de los granos son factores fundamentales que determinan la degradación a nivel ruminal tanto de la proteína como del almidón en los granos de sorgo, lo cual por consiguiente repercutirá en la respuesta del animal.

Palabras clave: grano de sorgo, genotipo, taninos, procesamiento.

SUMMARY

Different factors that affect ruminal utilization of sorghum grain are discussed in this review. The chemical composition of the grain and endosperm structure affect grain utilization. There are various types of protein that have different physical properties, biological activities and nutritional

Recibido: 03 de septiembre de 2003

Aceptado: 29 de diciembre de 2004

1. Ing.Agr., Ms. C. CONICET. C.C. 276 (7620) Balcarce, Bs.As.. E-mail: delfinamontiel@yahoo.com.ar

2. Ing.Agr., Ph. D. Fac.Cs. Agrarias, UNMdP. CONICET. C.C. 276 (7620) Balcarce, Bs.As. E-mail: jelizalde@arnet.com.ar

quality. The type and chemical composition of protein matrix affect physical characteristics on endosperm that may condition the starch granule exposition to enzymatic digestion. The genotype level of condensed tannins and degree of processing of grains are essential factors that determine protein and starch ruminal degradation of the sorghum grain, and affect animal performance too.

Key words: sorghum grain, genotype, tannins, processing.

1. INTRODUCCIÓN

Los granos de sorgo y maíz son de gran importancia para uso forrajero en el país. Si bien el grano de maíz posee un mayor contenido energético que el de sorgo (61, 55), este último grano posee importantes ventajas agronómicas en cuanto a su rusticidad y plasticidad que lo hace adaptable a diferentes zonas, y por ende constituye la única alternativa presente en varias regiones del país.

Los genotipos de sorgo varían en los contenidos de almidón, tipos de proteínas, contenido de taninos, estructura del endosperma, y en la digestibilidad **in vitro** del grano, lo cual se traduce en diferencias en las ganancias de peso (70, 32, 85). Los granos de sorgo poseen una alta variación en la concentración de taninos en su testa, lo que les confieren, bajo determinadas condiciones, resistencia al consumo por los pájaros (83). Sin embargo, los sorgos con alto contenido de taninos tienen una tasa de digestión (medida **in vitro**) más lenta que aquellos que no poseen esta característica de resistencia (30). Existen diversos tipos de sorgo, que se pueden clasificar de acuerdo a la estructura del endosperma en vítreos y harinosos. El endosperma vítreo posee una matriz proteica más compleja y continua que le otorga mayor dureza respecto al endosperma harinoso (61). Por lo tanto, la estructura del endosperma y la presencia de taninos determinan aspectos físicos y químicos del grano que podrían afectar la digestión del mismo. El objetivo de la presente revisión es analizar aquellos factores que determinan la digestión del grano de sorgo de manera tal que se nos permita elegir híbridos que posean mayor digestión ruminal lo cual

redundaría en un mejor aprovechamiento del mismo.

2. CONSTITUCIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS GRANOS DE SORGO

Los granos de cereales tales como el sorgo y el maíz, son considerados granos desnudos puesto que pierden las envolturas durante la cosecha. Estos granos, están constituidos por tres componentes: una capa protectora que los recubre o pericarpio, el embrión o germen y el tejido de almacenamiento o endosperma (Figura 1; 84). De los tres componentes la mayor proporción del peso del grano la constituye el endosperma, el cual puede variar entre un 80 a 85%, mientras que el germen oscila entre 7 y 12% y el pericarpio no supera el 8% (29).

El endosperma está conformado por áreas bien diferenciadas: una córnea o vitrea y otra harinosa, las que a su vez están rodeadas por una zona periférica o sub-aleurona (32) denominada endosperma periférico. La proporción en la que se encuentran cada una de dichas áreas varía según el híbrido que se considere (8). El endosperma, tanto vítreo como harinoso, está compuesto por gránulos de almidón, la matriz proteica y los cuerpos proteicos y, la proporción de cada uno de ellos como así también su tamaño depende del lugar en donde se ubiquen (porción vitrea como harinosa). La naturaleza y la composición química de la matriz proteica tiene un profundo efecto sobre las características físicas del endosperma y la exposición de los gránulos de almidón a la digestión enzimática (62).

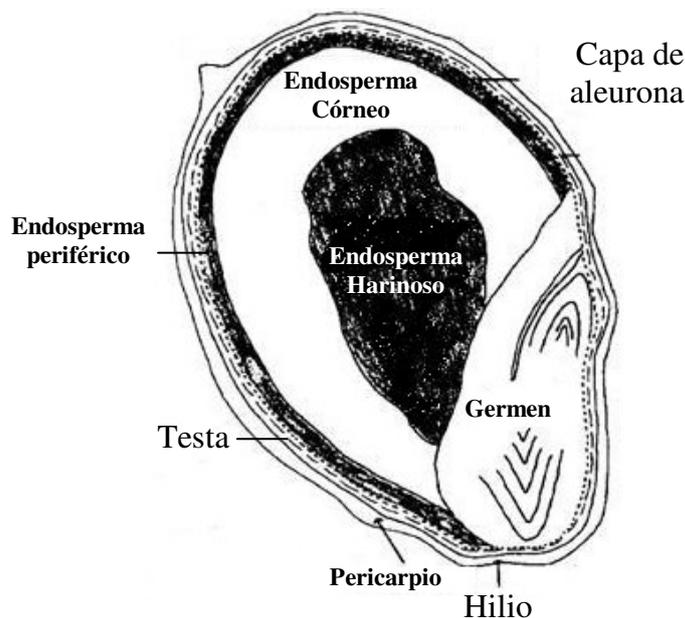


FIGURA 1: Diagrama de un cariopse de sorgo. (Adaptado de 84)
Figure 1: Diagram of sorghum caryopsis (Ref. 84)

Los granos de sorgo generalmente tienen una mayor proporción de endosperma periférico que el maíz. Dicho endosperma es difícil de definir, pero usualmente consiste de las primeras dos a seis capas de células que se encuentran por debajo de la capa de aleurona (76). La zona del endosperma periférico es extremadamente dura, densa y resistente a la entrada del agua. Dicha área está compuesta de varias capas de células que contienen mayor cantidad de cuerpos proteicos (prolaminas) y gránulos de almidón más pequeños que los del endosperma córneo propiamente dicho. Como consecuencia de la alta concentración de cuerpos proteicos en el área periférica, el almidón prácticamente no está disponible para la degradación enzimática (76). Las diferencias en la estructura del endosperma periférico del grano puede afectar la digestibilidad en mayor proporción que cualquier otro factor (75, 76). La alteración de esta zona es la que generaría la respuesta al procesamiento (84) y el consecuente aumento en la

digestión de los nutrientes (61). Si bien el grano de maíz también presenta endosperma periférico, el hecho de estar más desarrollado en el sorgo determinaría la menor digestión promedio de éste respecto del grano de maíz (61).

Los gránulos de almidón en los endospermas periférico y córneo están rodeados por cuerpos proteicos y se encuentran embebidos en una densa y continua matriz proteica. El endosperma harinoso localizado en el centro del grano, posee gránulos de almidón más grandes y en mayor cuantía que los otros endospermas, y la matriz proteica que los rodea es discontinua y con menor cantidad de cuerpos proteicos (75, 61, 32). Además, dicho endosperma, presenta espacios de aire por el menor empaquetado de los gránulos de almidón (84), los cuales son más susceptibles a acciones externas como el procesamiento de los granos o la digestión (30).

No solo el tamaño de los gránulos de almidón difiere entre los tipos de endospermas, sino también su forma. En el endosperma córneo los gránulos presentan forma angular, mientras que en el harinoso adoptan formas más redondeadas (84). Por su parte, los cuerpos proteicos también difieren en el tamaño y la disposición de acuerdo al endosperma en el que se presenten. En el endosperma córneo presentan un diámetro de $2\mu\text{m}$ y están insertos en forma apretada dentro de la matriz proteica. Por el contrario, en el endosperma harinoso los gránulos presentan un menor diámetro y se encuentran más dispersos (66).

El principal componente químico de los granos de sorgo es el almidón, el que puede variar entre un 70 a 80% de la materia seca del grano (61). Además, los granos presentan pequeñas cantidades de pectinas y azúcares simples, los cuales junto con el almidón componen los carbohidratos no estructurales del grano (49). Los gránulos de almidón están compuestos por dos moléculas principales, amilosa y amilopectina; la proporción de ambas en los gránulos determina la tasa y la extensión de la digestión (62). La amilosa es un polímero lineal compuesto de unidades de D-glucosa unidas por enlaces tipo α -1,4 (61, 32, 13). A pesar de esto se ha descubierto que la amilosa puede presentar un pequeño número de ramificaciones las cuales no superan el 1-2% de la molécula (10, 33). La proporción de amilosa en el almidón puede variar entre un 0 a 30%, dependiendo de la especie y de la variación genética dentro de la especie (61, 32). Generalmente, los cereales poseen entre un 20 a 30% de amilosa, pero existen los denominados granos tipo *waxy* o cerosos donde la cantidad de amilosa es muy pequeña o prácticamente no está presente (61).

La amilopectina es un polímero ramificado y comprende entre el 70 y 80% del almidón de los granos. Está formada por una cadena lineal de unidades α -1,4-D-glucosa y ramificaciones α -1,6 cada 20 ó 30 moléculas de glucosa, las que constituyen entre 4 ó 5% del

número total de uniones de la amilopectina. La cantidad de ramificaciones puede variar entre genotipos de una misma especie (10) y cada una de las ellas tiene una longitud de aproximadamente 20 unidades de glucosa (14). Rooney y Pflugfelder (61) indicaron que los gránulos de almidón presentan áreas organizadas o cristalinas, y áreas no organizadas o amorfas. La región cristalina está principalmente compuesta por amilopectina, y la zona amorfa es más rica en amilosa, menos densa que la cristalina. Las moléculas de amilosa y amilopectina permanecen juntas por uniones puente hidrógeno.

La proporción de amilosa y amilopectina varía entre granos y está determinada genéticamente (80). Las diferencias entre los contenidos de amilosa y amilopectina pueden afectar tanto la digestibilidad del almidón, como así también las propiedades de procesamiento de los granos. La amilosa se disuelve con cierta dificultad en agua y precipita en butanol, mientras que la amilopectina es la fracción del almidón más soluble en agua o en solución acuosa de butanol (83, 10). Por esta razón, la variación en la proporción de amilosa y amilopectina que se puede presentar entre híbridos podría estar relacionada con diferencias en la fracción soluble de los granos afectando la respuesta al procesamiento. La digestibilidad del almidón es inversamente proporcional al contenido de amilosa (35, 61), por lo cual los sorgos y maíces con mayor contenido de amilosa serían menos digestibles. Una de la teorías por la cual la amilosa disminuiría la hidrólisis se debería a que la primera orientaría hacia el interior de la misma las moléculas de amilopectina, de manera tal que incrementaría las uniones puente hidrógeno de las moléculas y por lo tanto limitaría tanto el hinchamiento de los gránulos de almidón como así también la hidrólisis enzimática (61).

El segundo componente que se encuentra en mayor proporción en el grano son las proteínas, y la concentración de las mismas aumenta desde el centro del endosperma hacia

el exterior, por lo que se podría afirmar que el área que rodea a la periferia del endosperma contiene la mayor concentración de proteínas (76). Seckinger y Wolf (66) indicaron que el endosperma córneo posee dos veces más de proteína que el harinoso. En el sorgo existen varios tipos de proteínas que exhiben diferencias respecto a sus propiedades físicas, actividad biológica, y calidad nutricional. Según lo propuesto por Osborne (citado por 83) las mismas se pueden clasificar, de acuerdo a su solubilidad en distintos solventes, en:

- 1) albúminas, solubles en agua;
- 2) globulinas, solubles en soluciones salinas;
- 3) prolaminas, solubles en alcohol y,
- 4) glutelinas, solubles en diluyentes alcalinos.

Las proteínas predominantes en el grano de sorgo son las prolaminas, también denominadas kafirinas, y se encuentran principalmente en el endosperma. Las kafirinas son deficientes en aminoácidos esenciales como lisina (66), metionina y triptófano (83, 13), lo que determina la baja calidad nutricional de la proteína del grano de sorgo. Existe una estrecha asociación entre la cantidad total de proteína del grano y el de kafirinas (81, 66). Por esto, a pesar de que el nivel de proteína aumenta la calidad nutricional del grano disminuye. De igual forma, Taylor, Schüssler y van der Walt (77) encontraron que al aumentar la cantidad total de proteínas en el grano, la principal fracción que se incrementó fueron las kafirinas. Eso no coincide con lo presentado por Chandrashekar y Kirleis (7), quienes no hallaron una relación consistente entre el contenido de proteínas totales y la presencia de kafirinas ($r=-0,07$).

Las glutelinas son las segundas proteínas en orden de importancia respecto a la cantidad presente en el grano, y junto con las prolaminas forman parte de las proteínas de reserva del mismo. La matriz proteica esta formada principalmente por glutelinas, mientras que los cuerpos proteicos están constituidos por kafiri-

nas (83, 66). Por último, las albúminas y globulinas se encuentran en pequeñas cantidades. En el grano de sorgo forman parte de las enzimas y otras sustancias biológicamente activas, y principalmente se encuentran ubicadas en la capa de aleurona (83).

La disponibilidad del almidón a nivel ruminal se encuentra fuertemente influenciada por la solubilidad y fermentación de las proteínas. El tipo y cantidad de proteínas de almacenamiento en el grano determina su solubilidad (79). Las prolaminas al ser insolubles en el licor ruminal afectarían en forma negativa la disponibilidad de almidón para la degradación bacteriana (79). El endosperma periférico que presenta el grano de sorgo, con gran contenido de cuerpos proteicos y por consiguiente de prolaminas, es la principal barrera que deben atravesar las bacterias ruminales sobre todo cuando el grano no se halla procesado.

3. INTERACCIÓN ALMIDÓN-PROTEÍNA EN GRANOS DE SORGO

El principal componente energético de los granos de sorgo y maíz es el almidón que se encuentra en el endosperma de las semillas. Existen factores físicos y químicos que afectan la disponibilidad del almidón para que sea hidrolizado por las enzimas. La accesibilidad a los gránulos de almidón depende de la composición química y el grosor de la pared de las células que los recubren, y de su asociación intracelular con proteínas que pueden impedir o disminuir el ataque enzimático (9). La matriz proteica y los cuerpos proteicos que rodean los gránulos de almidón del grano de sorgo limitan severamente el acceso bacteriano a este último, lo que afecta su digestibilidad y aprovechamiento por parte del animal. Ello se debe a la insolubilidad de la mayoría de las proteínas del endosperma y a la manera en que ellas enlazan los gránulos de almidón, aumentando la dificultad para digerir los granos de sorgo (83). McAllister, Phillippe, Rode y Cheng (40) indicaron

que luego que la cutícula es rota, la matriz proteica y la pared de las células del endosperma determinan la tasa a la cual los microorganismos atacan y penetran los gránulos de almidón.

La dureza o vitrosidad en los granos de sorgo y de maíz está relacionada con la proporción de ambos endospermas (vítreo y harinoso). Esto repercute a su vez sobre el contenido total de proteínas del grano y en la continuidad de la matriz proteica, ya que la misma se puede presentar en forma continua (endosperma córneo) o discontinua (endosperma harinoso) (32, 59). Además, Chandrashekar y Mazhar (8) demostraron que un grano más duro deposita una mayor cantidad de cuerpos proteicos y de prolaminas que uno más blando. Por su parte, Abdelrahman y Hosene (1) concluyeron que las prolaminas son las responsables de conferirle dureza al grano.

Existen diferencias entre los granos respecto al tamaño y las características de los gránulos de almidón que podrían afectar la digestión del almidón. Sin embargo, parecería que los roles que desempeñan la matriz proteica y los carbohidratos no almidonosos en unir dichos gránulos de almidón, es más importante que la estructura del gránulo **per se** en determinar su tasa y extensión de la digestión (39). Cuando estudiaron la digestibilidad de almidones purificados de cultivares de sorgo y maíz (24, 32) hallaron que el almidón del sorgo resultó ser más digestible que el del maíz. Sin embargo, esto no sucede cuando se incuban granos donde el almidón tiene interacción con la matriz proteica (61, 32), destacando entonces la importancia de la matriz proteica del endosperma en determinar la digestión del almidón por el animal.

Desde el punto de vista nutricional, las prolaminas (kafirinas) son las más importantes, debido a que no solo son las que se encuentran en mayor proporción en el grano de sorgo (más del 50% de la proteína total; 56, 77, 21), sino que también son las principales responsables de la disminución de la digestibilidad del

mismo (83, 85, 51, 52). En estudios donde se efectuaron tratamientos con proteasas (66, 7) se observó que la matriz proteica se digería antes que los cuerpos proteicos. Con ello quedó demostrado una mayor resistencia de los cuerpos proteicos ante la presencia de las enzimas, lo cual resulta lógico debido a que ellos son los principales puntos de deposición de las kafirinas.

De acuerdo a lo anterior, las proteínas en los granos (principalmente las prolaminas) pueden ser muy importantes en determinar la cantidad de almidón digerido a nivel ruminal además de otros factores tales como la presencia de taninos. Es por ello que McNeill, Potter, Riggs y Rooney (44) destacaron la necesidad de modificar la solubilidad o integridad de la matriz proteica que encapsula los gránulos de almidón para aumentar la eficiencia de utilización del mismo. Por su parte, Hale (citado por 22) indicó que la disrupción de la matriz proteica alrededor del almidón puede mejorar la digestión del grano procesado. Sullins y Rooney (75) hallaron también que la remoción de la matriz proteica que recubre los gránulos de almidón aumentó la tasa de hidrólisis de los mismos. Sin embargo, existen autores que no han encontrado interacción entre el contenido de proteínas totales y la desaparición **in vitro** del almidón (85).

La dureza o vitrosidad (proporción de endosperma córneo) juega un rol muy importante en la degradación ruminal del almidón, encontrándose estas variables inversamente correlacionadas (57, 58). Existen parámetros físicos y mecánicos usados para estimar la dureza y calidad comercial de los granos de maíz: peso hectolítrico, relación de molienda, test de flotación, densidad aparente (7, 11, 12, 61) y peso de 1000 semillas (59). Con granos de sorgo, Miller, Lowrey, Monson, Burton y Cruzado (46) observaron que aquellos genotipos que demostraron una mayor proporción de endosperma harinoso alcanzaron mayor digestibilidad **in situ**, y tendieron a presentar una menor densidad y peso de los granos. Por

su parte, Sullins y Rooney (75) también hallaron que granos con endosperma harinoso presentan menor densidad y peso hectolítrico. Halgren y Murty (citados por 8) utilizaron un test de flotación para distinguir la variabilidad existente entre los granos de sorgo respecto a su dureza. La flotación de los granos más duros es menor en una solución de densidad conocida (31). Al presente, se conocen las relaciones entre las propiedades físicas y dureza, así como la relación entre dureza y digestión.

Existe una gran variedad de genotipos en el grano de sorgo que se diferencian por las proporciones de endospermas vítreo y harinoso, y en la composición química, además del contenido de taninos. Si la dureza del grano está relacionada con la digestibilidad, aquellos métodos físicos destinados a estimar dureza deberían estar también relacionados con la degradabilidad ruminal.

4. EFECTO DEL GENOTIPO

El grano de sorgo ha sido tradicionalmente considerado de menor calidad respecto al de maíz (42, 23) debido a su composición química altamente variable, a la presencia del endosperma periférico más desarrollado, así como también a la existencia de más cuerpos proteicos presentes en el grano de sorgo. La variabilidad en su composición química puede ser atribuida en parte a las diversas condiciones ambientales a las que puede ser sometido durante su crecimiento y maduración ya que es un cultivo, que a diferencia del maíz, tiene una mayor adaptación respecto al clima y al suelo. Por esta razón, Stock (69) indicó que los híbridos de sorgo parecen ser más variables en la digestibilidad, tanto **in vitro** como **in vivo**, y en la tasa de digestión del almidón que los híbridos de maíz. Por otra parte, el valor alimenticio del sorgo está determinado genéticamente, porque el genotipo determina la naturaleza del tipo de endosperma, la composición química y la presencia de taninos.

Varios autores han evaluado la variación en la composición química de los granos atribuida al genotipo y hallaron que los mismos siempre diferían en al menos un atributo. Como se puede observar en el Cuadro 1 las diferencias más comunes se presentaron en el contenido de proteína bruta, pero también en la cantidad de almidón y taninos. Cabe aclarar que, si bien muchos de los items figuran con un guión (-), no significa que no existan diferencias, sino que no han sido evaluados en esos trabajos.

No solo la composición química de los granos de sorgo está altamente influenciada por el genotipo, sino también la textura del endosperma (harinoso, intermedio y córneo) y el tipo (normal, heterowaxy y waxy). Es por ello que las diferencias estructurales de los granos no solo pueden influir en la dureza de los mismos y la composición química, sino que también repercutirían en su comportamiento tanto **in vivo** como **in vitro** y en el subsiguiente aprovechamiento por los animales (30). Diferencias en la degradabilidad ruminal de la materia seca entre genotipos de sorgo fueron demostradas por Miller y otros (46), ya que hallaron valores **in situ** que oscilaron entre 56 y 81% entre genotipos de sorgos con diferentes texturas y tipos de endospermas previamente molidos e incubados durante 72 horas. Por su parte, McGinty y Riggs (43) sobre un total de siete híbridos, encontraron diferencias entre los híbridos en la digestibilidad **in vivo** de la materia seca y de la proteína bruta. Wester, Gramlich, Britton y Stock (85) evaluaron 48 híbridos comerciales de sorgo y detectaron diferencias en la desaparición **in vitro** del almidón como así también en el contenido de almidón de los mismos.

Holthaus, Smith y Richardson (28) estudiaron el efecto de los cultivares de sorgo sobre digestibilidad del almidón y de la materia seca en tres tipos de endospermas: normal, heterowaxy y waxy. Tanto la digestión del almidón como la de la materia seca se vio

CUADRO 1: Resumen de evaluaciones de las diferencias genotípicas en la composición química del grano de sorgo.

Table 1: Summary of reports of genotypic differences in chemical composition of sorghum grain.

Referencia	N° de genotipos	PB	Alm.	Taninos	Cenizas	FDA	Lípidos
Maxson, Fryar, Rooney y Krishnaprasad (37)	7	*	*	-	*	-	n.s.
Hibberd y otros (25)	9	*	*	*	-	-	-
Cagampang y Kirleis (6)	15	*	-	-	*	-	*
Hibberd y otros (26)	3	*	*	*	*	-	-
Hahn y Rooney (19)	5	*	*	-	-	-	-
Banda-Nyirenda, Vohra e Ingebretson (4)	11	*	*	*	*	*	*
Arteaga y Bertorelli (3)	6	*	-	*	*	*	*
Streeter y otros (70)	4	*	n.s.	*	-	-	-
Streeter, Wagner, Hibberd y Owens (71)	4	*	n.s.	-	-	n.s.	-
Streeter, Wagner, Hibberd y Owens (73)	6	*	*	*	-	n.s.	-
Wester y otros (85)	48	-	*	-	-	-	-

PB: proteína bruta; **Alm.:** almidón; **FDA:** fibra detergente ácido. *: Nivel de probabilidad $p < 0,05$; **n.s.:** no significativo; -, no evaluado.

PB: crude protein; **Alm:** starch; **FDA:** acid detergent fiber. **n.s.:** not significant; -, not measured.

influenciada por el tipo de grano, por lo que los autores concluyeron que el tipo de endosperma determina la tasa de fermentación en el rumen. Samford y otros (citados por 82) analizaron las diferencias que pueden provocar la textura del endosperma y el tipo de grano. Dichos autores hallaron diferentes porcentajes de digestión del almidón en el rumen, alcanzando valores de 48 y 80% para las texturas cornea y harinosa respectivamente, y de 68 y 75% en los endospermas de tipo normal y waxy, respectivamente. Los cultivares de sorgo tipo waxy poseen mayor valor alimenticio que los que no tienen esta característica (61, 32), debido a su mayor susceptibilidad a la acción de las enzimas digestivas que tiene la amilopectina (14). Los genotipos waxy también poseen una mayor solubilidad de la matriz proteica que rodea los gránulos de almidón (35) y, una distribución más uniforme de los cuerpos proteicos en el endosperma (76), lo cual favorece el ataque bacteriano.

McCollough en 1972 (citado por 85) indicó que las diferencias en performance de novillos alimentados con granos de sorgo se deben a la variación genética observada entre los híbridos utilizados. Wester y otros (85) evaluaron el efecto sobre la performance animal de novillos alimentados con dietas que contenían un 80% de granos de sorgos que diferían en las tasas de desaparición *in situ* del almidón (Cuadro 2). Las principales diferencias en performance la hallaron entre el híbrido de más rápida tasa de desaparición del almidón vs el de tasa más lenta, ya que los animales alimentados con el primero presentaron un aumento diario del peso vivo un 9% superior respecto a los otros (Cuadro 2). Por otro lado, a pesar de no hallar diferencias en el consumo y la eficiencia de conversión, detectaron una fuerte correlación positiva ($r = 0,97$) entre la eficiencia de conversión y la tasa de desaparición del almidón. Esto indicaría que la tasa de desaparición del almidón, la cual es dependien-

CUADRO 2: Efecto del híbrido de sorgo sobre la performance de novillos alimentados a corral con dietas basadas en 80% de grano de sorgo.

Table 2: Effect of sorghum hybrid on steer performance feedlot with 80% sorghum grain in diet.

	Híbridos de sorgo			
	A	B	C	D
Tasa de desaparición almidón (%/h)	7,0 a	6,8 b	6,6 bc	6,5 c
Consumo diario de materia seca (kg/día)	9,92	9,48	10,07	9,57
Aumento diario de peso vivo (kg)	1,33 a	1,24 ab	1,30 ab	1,22 c
Eficiencia de conversión (ganancia/alimento)	0,135	0,131	0,129	0,128

Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,1$). A y D: híbridos con rápida y lenta tasas de desaparición *in vitro* del almidón respectivamente. B y C: híbridos con tasas de desaparición intermedias.

Within rows, values without common superscripts differ ($p < 0.1$). A and D: hybrids with fastest and slowest *in vitro* rate of starch digestion, respectively. B and C: hybrids with intermediate *in vitro* rate of starch digestion. Referencia:85.

te del genotipo, tiene un importante efecto sobre la eficiencia de conversión del alimento.

A través de la técnica de degradabilidad *in situ*, Montiel (48) evaluó 14 genotipos de sorgo, obteniendo un ranking para la degradabilidad ruminal de la materia seca, proteína bruta y almidón. Las diferencias halladas entre los híbridos situados en los extremos de los rankings fueron de 31, 106 y 52% en la degradabilidad ruminal de la materia seca, proteína bruta y almidón respectivamente. Estos datos indican que existe variabilidad entre los híbridos de sorgo comerciales disponibles y que pueden ser identificados genotipos que presenten una mayor degradabilidad a nivel ruminal, lo cual repercutiría en su valor alimenticio.

5. EFECTO DEL CONTENIDO DE TANINOS

En el grano de sorgo existen compuestos fenólicos que pueden afectar su color, apariencia y calidad nutricional. Dichos compuestos pueden ser clasificados en base a su composición química en tres grupos: ácidos fenólicos, flavonoides y taninos (18). Los ácidos fenólicos se encuentran en todos los tipos de sorgos, mientras que los flavonoides no son siempre detectados. Los taninos se presentan concen-

trados en la testa de la semilla (parte del pericarpio), la cual es un tejido altamente pigmentado (36); aunque también se han encontrado pero en menor medida en el endosperma del grano (63).

Los ácidos fenólicos no tienen efecto sobre la calidad nutricional del grano, solo pueden causar un color indeseable en los alimentos cuando son procesados bajo condiciones alcalinas. Al igual que los ácidos fenólicos, los flavonoides, en el caso en que se hallen presentes, no parecen tener efectos sobre la digestibilidad ni en la palatabilidad de los granos (36).

Los taninos son compuestos polifenólicos de alto peso molecular (500-3000 Da), los cuales tienen la capacidad de formar fuertes complejos con las proteínas (17, 80, 34, 2, 36). La reactividad de los taninos con moléculas de significancia biológica tiene importancia desde el punto de vista nutricional (65). Ellos pueden ser clasificados en dos tipos: taninos hidrolizables (poliésteres de ácido gálico y varios azúcares individuales) y taninos condensados (67, 45). No hay evidencias de la presencia de grandes cantidades de taninos hidrolizables en los sorgos, mientras que los condensados son aquellos que se presentan en los sorgos denominados antipájaros (36).

Desde el punto de vista de la producción de granos, los taninos otorgan ventajas agronómicas como la resistencia a la depredación por pájaros cuando la carga de estos últimos no es alta y, en algunos casos, al daño por mohos e insectos. Además, les confieren una calidad favorable de almacenamiento al grano, y una mayor resistencia al deterioro ambiental. Al mismo tiempo, los taninos tienen un impacto negativo en el grano de sorgo como alimento, ya que presentan un efecto antinutricional. Dicho efecto es causado por la formación del complejo proteína-tanino, el cual ocasiona una disminución en el aprovechamiento del grano por los animales al verse disminuida su digestibilidad y por lo tanto la disponibilidad de nitrógeno para los microorganismos del rumen. Esto último acarrea una disminución en la digestión del almidón, razón por la cual, van Barneveld (79) en su trabajo los clasificó dentro de los componentes del alimento que también reducen la eficiencia de utilización de otros nutrientes.

Como consecuencia de la interacción entre las proteínas y los taninos no solo se ve afectada la digestibilidad del grano, sino que también se modifica su palatabilidad por el sabor astringente que le confiere. La estabilidad del complejo que se forma entre las proteínas y los taninos se debe a la formación de puentes hidrógeno (17, 18) y a las interacciones hidrofóbicas entre las moléculas (34, 36). Las proteínas difieren enormemente en cuanto a su afinidad por los taninos, y la especificidad de la interacción con los mismos es función de su tamaño, conformación y de las cargas de la molécula. Las proteínas ricas en prolinas (prolaminas) tienen una gran afinidad por los taninos, debido a su conformación abierta y a su capacidad de formar fuertes uniones puente hidrógeno (17, 34).

Los efectos antinutricionales de los taninos incluyen la disminución de la digestibilidad de las proteínas, la tasa de crecimiento, y de la eficiencia de conversión en bovinos (38), y en otros animales como ratas, aves y porci-

nos (67). Los taninos del sorgo reducen la digestibilidad y la eficiencia de utilización de los nutrientes desde un 3 a un 15% (84). Butler (citado por 45) indicó que los taninos tienen la capacidad de alterar en forma negativa los procesos digestivos, porque también se acomplejan con enzimas secretadas o con proteínas endógenas. Por otra parte, los taninos también son considerados como inhibidores del crecimiento bacteriano. Los polifenoles tienen la capacidad de reaccionar con la pared celular de las bacterias y las enzimas extracelulares secretadas por ellas. Cualquiera de las dos interacciones inhiben el transporte de nutrientes hacia el interior de la célula bacteriana, y esto es lo que ocasiona un retardo en el crecimiento de los microorganismos ruminales (45). Luego de hallar una reducida digestión total **in vivo** tanto de la proteína bruta como de la materia seca de los granos, McCollough, Riley, Drake y Brent (42) concluyeron que los sorgos con taninos poseen una menor digestibilidad. Armstrong y otros (citados por 34) aumentaron la digestibilidad de la proteína del grano desde 4,4% a un 18% al extraerle los taninos mediante un tratamiento con un álcali.

La presencia de taninos en el grano también puede afectar la degradabilidad del almidón. Esto fue hallado por Hibberd, Wagner, Schemm, Mitchell, Hintz y Weibel (25) y Stree-ter, Wagner, Hibberd, Mitchel y Oltjen (72) quienes, a través de la producción de gas **in vitro**, observaron una menor disponibilidad del almidón en aquellos genotipos con alta concentración de taninos (Figura 2). Además, esos mismos autores junto con Hibberd, Wagner, Hintz y Griffin (26), también hallaron una disminución en la desaparición **in vitro** de la materia seca a medida que aumentaba el nivel de taninos en los granos (Figura 2). Similares resultados fueron hallados previamente por Saba, Hale y Theurer (63) quienes también obtuvieron una depresión del 50% en la producción de gas y desaparición **in vitro** de la materia seca en un híbrido resistente a pájaros.

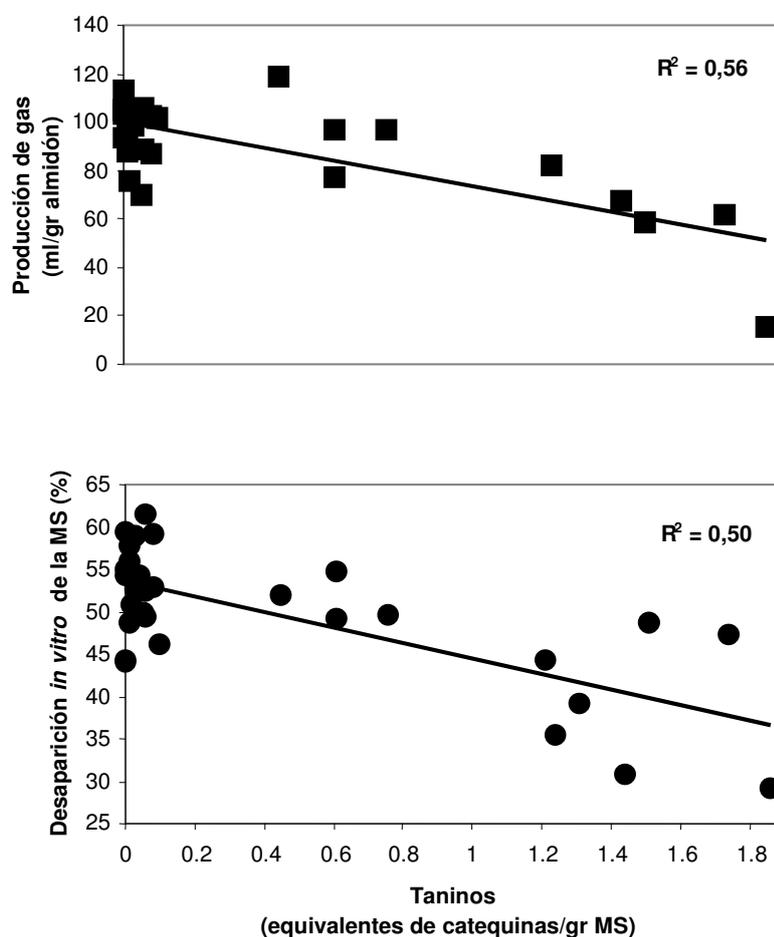


FIGURA 2: Relación entre el contenido de taninos en el grano de sorgo con la producción de gas *in vitro* (■, referencias: 25, 72) y desaparición *in vitro* de la materia seca (●: referencias: 25, 26, 72).

Figure 2: Relation between the sorghum tannins content with *in vitro* gas production and *in vitro* dry matter disappearance.

Hibberd y otros (25) evaluaron genotipos de sorgos con y sin taninos, los que además fueron comparados con maíces. Para ello determinaron la degradación de la materia seca de los granos molidos a 1mm e incubados *in vitro* durante 24 horas. A partir de dicho ensayo hallaron que la presencia de los taninos disminuye la degradación *in situ* de la materia seca en un 72% respecto de aquellos genotipos sin taninos (29,2 vs. 50,3%, respectiva-

mente). Por otra parte, los granos de maíz también resultaron más digestibles respecto a los sorgos con taninos, pero dichas diferencias no fueron consistentes entre maíces y sorgos sin taninos. La presencia de taninos, además de los factores antes citados, es determinante de las diferencias entre granos de sorgo y de maíz. Mitzner, Owen y Grant (47) efectuaron un estudio que tuvo como objetivo comparar el efecto de la utilización de los granos de sorgo

bajo en taninos o maíz sobre la performance de vacas lecheras en lactancia temprana. Dichos autores hallaron que los granos de sorgo y de maíz tuvieron similares efectos sobre la producción de leche y la composición de la misma, lo que indicaría que genotipos de sorgos con bajo contenido de taninos podrían presentar una similar performance alimenticia que el grano de maíz (Cuadro 3).

No solo en producción de leche han sido comparados la utilización los granos de sorgo y maíz. Schake, Driedger, Riggs y Clamme (64) engordaron novillos con dietas basadas en

granos de sorgo vs granos de maíz procesados de igual forma (*steam flaked*) e integraron las dietas en igual proporción. Dichos autores hallaron que si bien los animales alimentados con maíz tuvieron una mayor ganancia de peso y mejor eficiencia de conversión, la diferencia entre los mismos no fue significativa (Cuadro 4). Estos últimos dos trabajos confirman la teoría de que ciertos tipos de sorgos pueden sostener una performance animal similar o levemente inferior a la de los maíces, mientras que otros, por ejemplo los altos en taninos, resultan en una pobre performance productiva.

CUADRO 3: Performance de vacas lecheras en lactancia temprana.

Table 3: Performance of early lactation dairy cows.

	Dietas				
	SMF	SR	MMF	MR	ES
Consumo (kg MS/día)	24	25,1	23,2	23,4	0,1
Producción leche (kg/día)	37,3	35,1	36,5	34,4	0,2
Grasa de la leche (%)	3,29	3,65	3,50	3,64	0,03
Proteína de la leche (%)	3,15	3,07	3,09	3,28	0,02
Sólidos no grasos de la leche (%)	8,85	8,79	8,75	8,99	0,02
Leche corregida por sólidos (kg/día)	33,8	32,9	34,5	32,7	0,1

SMF: grano de sorgo molido fino, SR: grano de sorgo rolo, MMF: grano de maíz molido fino, MR: grano de maíz rolo. ES: error estándar.

SMF: finely ground sorghum, SR: rolled sorghum grain, MMF: finely ground corn grain, MR: rolled corn grain. ES: standard error. Adaptado de Mitzner y otros (47).

CUADRO 4: Performance de novillos engordados a corral con dietas basadas en grano de maíz o sorgo.

Table 4: Performance of feedlot steers feeding with corn and sorghum grain .

	Tratamientos				Error estándar
	Maíz		Sorgo		
Repetición	I	II	I	II	
N° de novillos	100	100	100	100	
Peso inicial (kg)	245	249	249	250	1,1
Peso final (kg)	472	471	471	470	1,8
Ganancia diaria de peso (kg/animal/día)	1,41	1,38	1,37	1,36	0,04
		1,39		1,37	
Consumo diario (kg/animal/día)	11,6	11,3	11,6	11,1	
Eficiencia de conversión (kg consumido/ kg ganado)		8,2		8,3	

Adaptado de Schake y otros (64).

Maxson, Shirley, Bertrand y Palmer (38) observaron que los novillos alimentados **ad libitum** con sorgos con alto contenido de taninos debieron consumir 2,38 kg más de grano para alcanzar la misma ganancia de peso que los alimentados con sorgos que no eran antipájaros (Cuadro 5). Gran parte de la variación en la performance animal puede ser explicada por diferencias varietales en el sitio y la extensión de la digestión. Hibberd y otros (26) hallaron que la fermentación ruminal del almidón difirió en un 25% entre variedades.

Por el contrario, hay autores que no encontraron diferencias en la degradación ruminal de la materia orgánica, el almidón y la proteína entre sorgos con y sin taninos. Entre ellos, Streeter, Wagner, Hibberd y Owens (70) hallaron similares degradabilidades de la mate-

ria orgánica y del almidón en vaquillonas alimentadas con sorgos con y sin taninos, y además existió una tendencia ($p=0,13$) a que los sorgos resistentes a pájaros presenten un mayor aprovechamiento del almidón a nivel ruminal (Cuadro 6). Similar comportamiento hallaron Hibberd y otros (26) quienes no notaron disminución en la digestibilidad ruminal de la materia orgánica verdadera y del almidón en sorgos resistentes a pájaros respecto a los que no lo son (Cuadro 6). Además dichos autores no encontraron efecto de los taninos sobre la degradación de las proteínas, al no verse incrementado el escape del nitrógeno del alimento desde el rumen. Esto indicaría que no es totalmente clara la influencia negativa de los taninos sobre la digestión **in situ** del grano de sorgo.

CUADRO 5: Performance de novillos alimentados **ad libitum** con sorgos con y sin taninos (78% de la ración).

Table 5: Performance of **ad libitum** fed steers with sorghum with and without tannins (78% of ration).

Dietas	Sorgo sin taninos	Sorgo con taninos
Peso inicial (kg)	325	317
Peso final (kg)	469	444
Ganancia diaria (kg/animal)	1,16	1,01
Consumo diario (kg/animal/día)	8,95	10,2
Eficiencia de conversión (kg alimento/kg ganado)	7,62	10

Referencia: Maxson y otros (38).

CUADRO 6: Efecto de los taninos sobre la degradabilidad ruminal **in vivo** de la materia orgánica y del almidón del grano de sorgo.

Table 6: Effect of tannins on organic matter and starch **in vivo** ruminal degradability of sorghum grain.

	Materia orgánica (%) *		Almidón (%)*	
	Bajo taninos	Alto taninos	Bajo taninos	Alto taninos
Streeter y otros (70)	56,2	52,5	68,7	75,2
Hibberd y otros (26)	58,5	57,3	71,1	75,2

* Degradabilidad ruminal, expresada como porcentaje de lo consumido. Nivel de taninos: bajo taninos: 0,02 equivalentes de catequina/g; alto taninos: 1,54 equivalentes de catequina/g

* Ruminal degradability, % of intake. Tannins level: low tannins: 0.02 catechin equivalents/g; high tannins: 1.54 catechin equivalents/g.

6. EFECTO DEL PROCESAMIENTO

El principal efecto del procesado de los granos es alterar el sitio de digestión del almidón pasándolo desde el intestino hacia el rumen, con un consecuente incremento adicional en el porcentaje digerido en ambos sitios (78). El almidón de los granos de sorgo es generalmente considerado como menos accesible a la degradación enzimática del animal que el de otros granos (61). Por lo tanto, cualquier mejora en la digestión ruminal del grano a través del procesamiento aumentaría la eficiencia de utilización por parte de los animales. La accesibilidad de las enzimas ruminales e intestinales al almidón de los granos afectará tanto la tasa como el grado de la digestión del mismo en los diferentes sitios. La tasa de digestión del almidón del grano de sorgo en el rumen es menor en relación a otros granos (68) y varía inversamente con el tamaño de la partícula del grano (16).

Un grano entero con el pericarpio intacto es muy resistente a la digestión ruminal, debido a que al estar entero es extremadamente difícil la fijación bacteriana (41, 50). Nordin y Campling (50) indican que los microorganismos ruminales no son capaces de atacar la mayoría de los granos enteros debido a la naturaleza de la cubierta exterior. La ruptura ocasionada por la masticación puede aumentar la susceptibilidad a la digestión. La ruptura de la barrera física que recubre los granos a través del procesamiento, no solo reduce el tamaño de partículas, sino que también incrementa la superficie de contacto disponible para la unión de los microorganismos y el ataque enzimático (41). Sin embargo, para el caso particular del grano de sorgo, donde la ruptura por masticación es muy escasa (5 a 22% del grano entero, dependiendo del peso del animal), es indispensable su procesamiento para alimentar bovinos de cualquier categoría y así obtener una elevada digestibilidad (74). Un método de procesamiento tan simple como el molido, produce la ruptura de la cubierta seminal, reduce el tamaño de

partículas e incrementa la superficie del área para la digestión (62).

Los granos responden de diferente manera ante el procesamiento, y la magnitud de la respuesta al procesamiento sobre la utilización del almidón es mayor en el sorgo y el maíz que en la cebada (78). Esto remarca las diferencias que existen entre los tipos de granos en relación a la digestibilidad del almidón y la proteína (78) y a la interacción entre dichos componentes. En el Cuadro 7 se presenta una recopilación de trabajos donde se determinó la degradabilidad **in situ**, a través de bolsas de dacrón, de sorgos que fueron incubados enteros y molidos. Como se puede apreciar, un simple procesado como el molido de los granos aumentó en todos los casos la degradabilidad ruminal del grano molido aproximadamente tres veces respecto al entero.

Strizler, Gingins y Santucho (74), utilizando novillos de 250 kg de peso promedio alimentados con granos de sorgo entero, hallaron que aproximadamente la mitad de los granos consumidos se excretaron enteros por la heces. Sin embargo, el peso promedio de los granos eliminados fue menor que el de los granos ingeridos, aunque dicha diferencia fue de solo 6,5% (74). Por otra parte, se encontró que el 30% de los granos eran eliminados enteros en las heces en vacas alimentadas con granos de sorgo entero, motivo por el cual es importante procesar el grano para su mejor aprovechamiento en vacunos (53). Dicho procesamiento puede ser realizado por combinaciones de calor, vapor, agua y acciones mecánicas (30). De este modo, la amilasa pancreática actuará más fácilmente sobre las partículas de almidón dispersadas (14). A pesar de que las amilasas del tracto digestivo de los animales pueden digerir el almidón no procesado, su acción es más rápida y completa cuando actúan sobre almidones procesados (Walker y Hope, citados por 54). Es sabido que aquellos granos y tipos de procesamiento que tienen una alta degradabilidad ruminal parecen también presentar una mayor digestibilidad total del almidón (78).

CUADRO 7: Resumen de la digestión ruminal *in situ* del grano de sorgo incubado entero y molido.
Table 7: Summary of *in situ* ruminal digestion of sorghum grain incubated whole and ground.

Referencia	Tiempo de incubación (hs)	Degradación ruminal (%)	
		Entero	Molido
Miller y otros (46)	48	19,7	60
Nordin y Campling (50)	48	17	51
Stritzler y otros (74)	48	10	90
Pieroni (60)	20	14,3	46,4

Los métodos de procesamiento de los granos para reducir el tamaño de las partículas o alterar la matriz proteica tienen como objetivo incrementar la digestión principalmente del almidón, tanto en el rumen como en el intestino delgado (54). La magnitud de la mejora en la utilización del almidón con el procesamiento es inversamente proporcional a la digestibilidad del almidón de los granos sin procesar y a la intensidad del procesamiento. Si bien existen procesos físicos y químicos de complejidad variable que pueden mejorar las características nutricionales de los granos (20, 27, 44, 68, 55), en el país se recurre casi exclusivamente al molido, quebrado, aplastado y ensilado húmedo de los mismos, es decir que se utilizan procesados menos enérgicos respecto a otros países. La digestibilidad total del almidón de los granos de sorgos que fueron muy procesados (tratados con vapor, micronizados o reconstituidos) alcanzó un promedio del 98%, mientras que cuando fueron menos procesados (rolados en seco o molidos) la misma fue del 91% (78).

El sorgo presenta una alta respuesta al procesamiento en relación a otros granos (78) como el maíz. Durante el molido de los granos ocurre un aumento en la susceptibilidad a la amilolisis y en la capacidad para absorber agua, además de ir acompañado por un incremento en la solubilidad (13). Stock y Mader (68) basándose en diez experimentos hallaron que el grano de sorgo finamente molido mejora la eficiencia de conversión en un 5% respecto a uno molido más grueso, ya que aumenta la ganancia de peso vivo de los animales y a su vez disminuye el consumo (Cuadro 8). Esto indica que en el caso particular del grano de sorgo se justifica utilizar métodos de procesamiento más enérgicos, aún dentro de los procesamientos mecánicos. Por el contrario, Galyeen, Wagner y Owens (15) no hallaron diferencias en la degradación ruminal *in vivo* cuando se alimentaron animales con maíces molidos hasta llegar a tamaños de partícula de 3, 5 y 8 mm, no justificándose en el caso del maíz.

CUADRO 8: Efecto del tamaño de molido en granos de sorgo sobre la performance de novillitos.
Table 8: Effect of sorghum grain size ground on yearling steers performance.

	Molido fino vs. molido grueso ¹
Ganancia diaria de peso vivo (% ²)	+ 1
Consumo diario (% ²)	- 6
Eficiencia de conversión (% ²)	+ 5

¹ Testigo. ² Porcentaje de mejora respecto al testigo. N° de ensayos: 10.
¹Control. ² Percent of improvement over control method. N° experiment: 10 Adaptado de Stock y Mader, (68)

Sin embargo, cuando se compara el grano de sorgo con el de maíz, es necesario considerar que en maíz también existe una variación entre genotipos, aunque ésta es menor que en sorgo. Philippeau y Michalet-Doreau (57) hallaron menores tasas y extensión de la digestión de los maíces tipo flint con respecto al dentado.

Los genotipos de sorgo pueden modificar el efecto del procesamiento bajo las condiciones ambientales en las que se desarrollaron. A pesar de ello, no existe información referente al efecto del procesado con distintos grados de molido y su interacción con el genotipo sobre la digestibilidad ruminal de la materia seca, la proteína bruta y el almidón. Tampoco existe información del efecto de procesado del sorgo comparado con genotipos extremos de maíz (flint y dentado) procesados de igual forma.

7. CONCLUSIONES

El aprovechamiento de los granos de sorgo por los bovinos depende de una serie de factores que se deben considerar. Las características físicas del endosperma, los tipos de proteínas que lo componen y la interacción de los gránulos de almidón con la matriz proteica determinan la accesibilidad de los microorganismos ruminales a los mismos.

El valor alimenticio del grano no solo depende de las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolle el cultivo, sino que también está fuertemente influenciado por el genotipo, porque éste último determina la naturaleza del tipo de endosperma, la composición química y la presencia de taninos. En la mayoría de los experimentos los taninos disminuyeron la degradación del grano de sorgo a nivel ruminal. La formación del complejo proteína-taninos no solo reduce la disponibilidad de nitrógeno para los microorganismos del rumen, sino también la digestión del almidón. Por otra parte, debido a que el almidón del grano de sorgo es considerado de menos accesibilidad a la degradación por el animal respecto a otros

granos, es fundamental el procesamiento del mismo para lograr un máximo aprovechamiento. A través de un método de procesamiento simple como es el molido de los granos, se produce una reducción del tamaño de partículas así como una alteración de la matriz proteica, lo que provoca un incremento en la digestión del almidón tanto en el rumen como en el intestino delgado.

Por todo lo especificado anteriormente, el genotipo, la presencia de taninos y el procesamiento del grano de sorgo, deben ser tenidos en cuenta al momento de evaluar el uso del grano de sorgo como alimento para los bovinos en cualquier sistema de producción.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABDELRAHMAN, A.A. y HOSENEY, R.C. 1984. Basis for hardness in pearl millet, grain sorghum, and corn. *Cereal Chem.* 61:232-235.
2. AGANGA, A.A. y MOSASE, K.W. 2001. Tannin content, nutritive value and dry matter digestibility of *Lonchocarpus capassa*, *Zizyphus mucronata*, *Sclerocarya birrea*, *Kirkia acuminata* and *Rhus lancea* seeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 91:107-113.
3. ARTEAGA, J. y BERTORELLI, L. 1989. Evaluación nutricional de la proteína del grano de seis cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Rev. Fac. Agron. (Macaraya)*. 15: 213-224.
4. BANDA-NYIRENDA, D.B.G., VOHRA, P. y INGEBRETSON, K.H. 1987. Nutritional evaluation of some varieties of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Cereal Chem.* 64:413-417.
5. BEAUCHEMIN, K.A., McALLISTER, T.A., DONG, Y., FARR, B.I. y CHENG, K.J. 1994. Effects of mastication on digestion of whole cereal grains by cattle. *J. Anim. Sci.* 72:236-246.
6. CAGAMPANG, G.B. y KIRLEIS, A.W. 1984. Relationship of sorghum grain hardness to selected physical and chemical measurements of grain quality. *Cereal Chem.* 61:100-105.
7. CHANDRASHEKAR, A. y KIRLEIS, A.W. 1988. Influence of protein on starch gelatinization in sorghum. *Cereal Chem.* 65:457-462.

8. CHANDRASHEKAR, A. y MAZHAR, H. 1999. The biochemical basis and implications of grain strength in sorghum and maize. *J. Cereal Sci.* 30:193-207.
9. CHENG, K.J., FORSBERG, C.W., MINATO, H. y COSTERTON, J.W. 1991. Microbial ecology and physiology of feed degradation within the rumen. In: *Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminants: Proceeding of the Seventh International Symposium on Ruminant Physiology*. pp: 595-624.
10. CURÁ, J.A. y KRISMAN, C.R. 1990. Cereal grains: a study of their α -1,4 - α -1,6 gluco-polysaccharide composition. *Starch/Stärke* 5:171-175.
11. DE DIOS, C.A., PUIG, R.C. y ROBUTTI, J.L. 1990. Caracterización de la calidad del maíz argentino. Estación Experimental Agropecuaria, INTA Pergamino. Informe Técnico N° 241. 12 pp.
12. DE DIOS, C.A., PUIG, R.C. y ROBUTTI, J.L. 1992. Tipificación de maíces por algunos caracteres de sus granos. Estación Experimental Agropecuaria, INTA Pergamino. Informe Técnico N° 265. 12 pp.
13. EVERS, A.D., BLAKENEY, A.B. y O'BRIEN, L. 1999. Cereal structure and composition. *Aust. J. Agric. Res.* 50:629-650.
14. FRENCH, D. 1973. Chemical and physical properties of starch. *J. Anim. Sci.* 37:1049-1061.
15. GALYEAN, M.L., WAGNER, D.G. y OWENS, F.N. 1979. Corn particle size and site and extent of digestion by steers. *J. Anim. Sci.* 49(1):204-210.
16. GALYEAN, M.L., WAGNER, D.G. y OWENS, F.N. 1981. Dry matter and starch disappearance of corn and sorghum as influenced by particle size and processing. *J. Dairy Sci.* 64:1804-1812.
17. HAGERMAN, A.E. y BUTLER, L.G. 1981. The specificity of proanthocyanidin-protein interactions. *J. Biol. Chem.* 256:4494-4497.
18. HAHN, D.H., ROONEY, L.W. y EARP, C.F. 1984. Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World.* 26:776-779.
19. HAHN, D.H. y ROONEY, L.W. 1986. Effect of genotype on tannins and phenols of sorghum. *Cereal Chem.* 63:4-8.
20. HALE, W.H. 1973. Influence of processing on the utilization of grains (starch) by ruminants. *J. Anim. Sci.* 37:1075-1080.
21. HAMAKER, B.R., MOHAMED, A.A., HABBEN, J.E., HUANG, C.P. y LARKINS, B.A. 1995. Efficient procedure for extracting maize and sorghum kernel proteins reveals higher prolamin contents than the conventional method. *Cereal Chem.* 72: 583-588.
22. HARBERS, L.H. 1975. Starch granule structural changes and amylolytic patterns in processed sorghum grain. *J. Anim. Sci.* 41:1496-1501.
23. HERRERA-SALDANA, R.E., HUBER, J.T. y POORE, M.H. 1990. Dry matter, crude protein, and starch degradability of five cereal grains. *J. Dairy Sci.* 73:2386-2393.
24. HIBBERD, C.A., WAGNER, D.G., SCHEMM, R.L., MITCHELL, E.D. Jr., WEIBEL, D.E. y HINTZ, R.L. 1982a. Digestibility characteristics of isolated starch from sorghum and corn grain. *J. Anim. Sci.* 55(6):1490-1497.
25. HIBBERD, C.A., WAGNER, D.G., SCHEMM, R.L., MITCHELL, E.D. Jr., HINTZ, R.L. y WEIBEL, D.E. 1982b. Nutritive characteristics of different varieties of sorghum and corn grain. *J. Anim. Sci.* 55:665-672.
26. HIBBERD, C.A., WAGNER, D.G., HINTZ, R.L. y GRIFFIN, D.D. 1985. Effect of sorghum grain variety and reconstitution on site and extent of starch and protein digestion in steers. *J. Anim. Sci.* 61:702-712.
27. HINMAN, D.D. y JOHNSON, R.R. 1974. Influence of processing methods on digestion of sorghum starch in high concentrate beef cattle rations. *J. Anim. Sci.* 39:417-422.
28. HOLTHAUS, D.L., SMITH, K.J. y RICHARSON, C.R. 1996. Effect of grain sorghum cultivar on starch availability, dry matter digestibility and starch solubility when steam flaked. *J. Anim. Sci.* 74(suppl. 1):269.
29. HUBBARD, J.E., HALL, H.H. y EARLE, F.R. 1950. Composition of the component parts of the sorghum kernel. *Cereal Chem.* 27:415-420.
30. HUNTINGTON, G.B. 1997. Starch utilization by ruminants: from basics to the bunk. *J. Anim. Sci.* 75:852-867.
31. JAMBUNATHAN, R., KHERDEKAR, M.S. y STENHOUSE, J.W. 1992. Sorghum grain hardness and its relationship to mold susceptibility and mold resistance. *J. Agric. Food Chem.* 40:1403-1408.
32. KOTARSKI, S.F., WANISKA, R.D. y THURN, K.K. 1992. Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *J. Nutrition.* 122: 178-190.

33. KRISMAN, C.R. y CURÁ, J.A. 1991. Corn starch (α 1,4- α 1,6) glucopolysaccharides – Correlation between amylose:amylopectin ratios and physical properties of the grains. *Starch/Stärke* .43:291-294.
34. KUMAR, R. y SINGH, M. 1984. Tannins: their adverse role in ruminant nutrition. *J. Agric. Food Chem.* 32:447-453.
35. LICHTENWALNER, R.C., ELLIS, E.B. y ROONEY, L.W. 1978. Effect of incremental dosages of the waxy gene of sorghum on digestibility. *J. Anim. Sci.* 46:1113-1119.
36. MAGALHÃES, P.C., RODRIGUES, W.A. y DURÃES, F.O.M. 2001. Tanino no grão de sorgo. Bases fisiológicas e métodos de determinação. <http://www.cnpms.embrapa.br/circu27.html>
37. MAXSON, E.D., FRYAR, W.B., ROONEY, L.W. y KRISHNAPRASAD, M.N. 1971. Milling properties of sorghum grain with different proportions of corneous to flourey endosperm. *Cereal Chem.* 48:478-490.
38. MAXSON, W.E., SHIRLEY, R.L., BERTRAND, J.E. y PALMER, A.Z. 1973. Energy values of corn, bird-resistant and non-bird-resistant sorghum grain in rations fed to steers. *J. Anim. Sci.* 37:1451-1457.
39. McALLISTER, T.A., RODE, L.M., MAJOR, D.J., CHENG, K.J. y BUCHANAN-SMITH, J.G. 1990. Effect of ruminal microbial colonization on cereal grain digestion. *Can. J. Anim. Sci.* 70:571-579.
40. McALLISTER, T.A., PHILLIPPE, R.C., RODE, L.M. y CHENG, K.J. 1993. Effect of the protein matrix on the digestion of cereal grains by ruminal microorganisms. *J. Anim. Sci.* 71: 205-212.
41. McALLISTER, T.A., BAE, H.D., JONES, G.A. y CHENG, K.J. 1994. Microbial attachment and feed digestion in the rumen. *J. Anim. Sci.* 72:3004-3018.
42. McCOLLOUGH, R.L., RILEY, J.G., DRAKE, C.L. y BRENT, B.E. 1972. Digestibility of seven hybrid grain sorghums and two hybrid corns. *J. Anim. Sci.* 35: 270 (Abstr.).
43. McGINTY, D.D. y RIGGS, J.K. 1968. Variation in digestibility of sorghum grain varieties. *J. Anim. Sci.* 27:1170 (Abstr.).
44. McNEILL, J.W., POTTER, G.D., RIGGS, J.K. y ROONEY, L.W. 1975. Chemical and physical properties of processed sorghum grain carbohydrates. *J. Anim. Sci.* 40:335-341.
45. McSWEENEY, C.S., PALMER, B., McNEILL, D.M. y KRAUSE, D.O. 2001. Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* 91:83-93.
46. MILLER, F.R., LOWREY, R.S., MONSON, W.G., BURTON, G.W. y CRUZADO, H.J. 1972. Estimates of dry matter digestibility differences in grain of some **Sorghum bicolor** (L.) Moench varieties. *Crop Sci.* 12:563-566.
47. MITZNER, K.C., OWEN, F.G. y GRANT, R.J. 1994. Comparison of sorghum and corn grains in early and midlactation diets for dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77:1044-1051.
48. MONTIEL, M.D. 2003. Degradabilidad ruminal del grano de sorgo en vacunos. Efectos del genotipo y del procesamiento. Tesis Magister Scientiae. FCA UNMdP – EEA INTA Balcarce, Argentina. 103 pp.
49. NOCEK, J.E. y TAMMINGA, S. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598-3629.
50. NORDIN, M. y CAMPLING, R.C. 1976. Digestibility studies with cows given whole and rolled cereal grains. *Anim. Prod.* 23:305-315.
51. ORIA, M.P., HAMAKER, B.R. y SHULL, J.M. 1995. Resistance of sorghum α -, β -, γ -kafirins to pepsin digestion. *J. Agric. Food Chem.* 43: 2146-2153.
52. ORIA, M.P., HAMAKER, B.R., AXTELL, J.D. y HUANG, C.P. 2000. A highly digestible sorghum mutant cultivar exhibits a unique folded structure of endosperm protein bodies. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 97:5065-5070.
53. ØRSKOV, E.R. 1986. Starch digestion and utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 63:1624-1663.
54. OWENS, F.N., ZINN, R.A. y KIN, Y.K. 1986. Limits to starch digestion in the ruminant small intestine. *J. Anim. Sci.* 63:1634-1648.
55. OWENS, F.N., SECRIST, D.S., HILL, W.J. y GILL, D.R. 1997. The effect of grain source and grain processing on performance of feedlot cattle: a review. *J. Anim. Sci.* 75: 868-879.
56. PAULLIS, J.W. y WALL, J.S. 1979. Distribution and electrophoretic properties of alcohol-soluble proteins in normal and high-lysine sorghums. *Cereal Chem.* 56: 20-23.
57. PHILIPPEAU, C. y MICHALET-DOREAU, B. 1997. Influence of genotype and stage of maturity of

- maize on rate of ruminal starch degradation. Anim. Feed Sci. Technol. 68: 25-35.
58. PHILIPPEAU, C., LANDRY, J. y MICHALET-DO-REAU, B. 1998. Influence of the biochemical and physical characteristics of the maize grain on ruminal starch degradation. J. Agric. Food Chem. 46:4287-4291.
59. PHILIPPEAU, C., LE DESCHAULT DE MONREDON, F. y MICHALET-DOREAU, B. 1999. Relationship between ruminal starch degradation and the physical characteristics of corn grain. J. Anim. Sci. 77:238-243.
60. PIERONI, G.A. 2000. Utilización de grano de sorgo tratado con vapor en la suplementación de vacas lecheras en pastoreo. Tesis Magister Scientiae. FCA UNMdP – EEA INTA Balcarce, Argentina. 94 pp.
61. ROONEY, L.W. y PFULGFELDER, R.L. 1986. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. J. Anim. Sci. 63:1067-1623.
62. ROWE, J.B., CHOCT, M. y PETHICK, D.W. 1999. Processing cereal grains for animal feeding. Aust. J. Agric. Res. 50:721-736.
63. SABA, W.J., HALE, W.H. y THEURER, B. 1972. **In vitro** rumen fermentation studies with a bird resistant sorghum grain. J. Anim. Sci. 35:1076-1082.
64. SCHAKE, L.M., DRIEDGER, A., RIGGS, J.K. y CLAMME, D.N. 1976. Corn and grain sorghum evaluation for beef cattle. J. Anim. Sci. 43:959-965.
65. SCHOFIELD, P., MBUGUA, D.M. y PELL, A.N. 2001. Analysis of condensed tannins: a review. Anim. Feed Sci. Technol. 91:21-40.
66. SECKINGER, H.L. y WOLF, M.J. 1973. Sorghum protein ultrastructure as it relates to composition. Cereal Chem. 50: 455-465.
67. SHIRLEY, B.W. 1998. Flavonoids in seeds and grains: physiological function, agronomic importance and the genetics of biosynthesis. Seed Sci. Res. 8:415-422.
68. STOCK, R.A. y MADER, T. 1987. Grain sorghum processing for beef cattle. <http://www.ianr.unl.edu/pubs/beef/g136.htm>
69. STOCK, R.A. 1999. Nutritional benefits of specialty grain hybrids in beef feedlot diets. J. Anim. Sci. Vol. 77, Suppl. 2/J. Dairy Sci. Vol. 82, Suppl. 2:208-212.
70. STREETER, M.N., WAGNER, D.G., HIBBERD, C.A. y OWENS, F.N. 1990a. The effect of sorghum grain variety on site and extent of digestion in beef heifers. J. Anim. Sci. 68:1121-1132.
71. STREETER, M.N., WAGNER, D.G., HIBBERD, C.A. y OWENS, F.N. 1990b. Comparison of corn with four sorghum grain hybrids: site and extent of digestion in steers. J. Anim. Sci. 68:3429-3440.
72. STREETER, M.N., WAGNER, D.G., HIBBERD, C.A., MITCHELL, E.D. Jr. y OLTJEN, J.W. 1990c. Effect of variety of sorghum grain on digestion and availability of dry matter and starch **in vitro**. Anim. Feed Sci. Technol. 29:279-287.
73. STREETER, M.N., WAGNER, D.G., OWENS, F.N. y HIBBERD, C.A. 1991. The effect of pure and partial yellow endosperm sorghum grain hybrids on site and extent of digestion in beef steers. J. Anim. Sci. 69:2571-2584.
74. STRITZLER, N., GINGINS, M. y SANTUCHO, G. 1982. Efecto del molido sobre la digestibilidad del grano de sorgo en bovinos. Prod. Anim. 9:3-7.
75. SULLINS, R.D. y ROONEY, L.W. 1974. Microscopic evaluation of the digestibility of sorghum lines that differ in endosperm characteristics. Cereal Chem. 51:134-142.
76. SULLINS, R.D. y ROONEY, L.W. 1975. Light and scanning electron microscopic studies of waxy and nonwaxy endosperm sorghum varieties. Cereal Chem. 52:361-366.
77. TAYLOR, J.R.N., SCHÜSSLER, L. y van der WALT, H. 1984. Fractionation of proteins from low-tannin sorghum grain. J. Agric. Food Chem. 32: 149-154.
78. THEURER, C.B. 1986. Grain processing effects on starch utilization by ruminants. J. Anim. Sci. 63:1649-1662.
79. VAN BARNEVELD, S.L. 1999. Chemical and physical characteristics of grains related to variability in energy and amino acid availability in ruminants: a review. Aust. J. Agric. Res. 50:651-666.
80. VAN SOEST, P.J. 1994. Carbohydrates. In: Nutritional ecology of the ruminant (2nd Ed). Cornell Univ. Press, Ithaca, NY. 476pp.
81. VIRUPAKSHA, T.K. y SASTRY, L.V.S. 1968. Studies on the protein content and amino acid composition of sorghum grain. J. Agr. Food Chem. 16:199-203.
82. WALDO, D.R. 1973. Extent and partition of cereal grains starch digestion in ruminants. J. Anim. Sci. 37:1062-1073.

83. WALL, J.S. y BLESSIN, C.W. 1970. Composition of sorghum plant and grain. *In*: WALL, J.S. y ROSS, W.M. (eds). Sorghum production and utilization. AVI Publishing Co, W, Conn. Westport. 702pp.
84. WANISKA, R.D. 2000. Structure, phenolic compounds, and antifungal proteins of sorghum caryopses. Pag. 72-106. *In*: Technical and Institutional Options for Sorghum Grain Mold Management: Proceeding of an International Consultation, 18-19 May 2000, ICRISAT, Patancheru, India (Chandrashekar,A., Bandyopadhyay,R., and Hall,A.J.,eds.).299pp
85. WESTER, T.J., GRAMLICH, S.M., BRITTON, R.A. y STOCK, R.A. 1992. Effect of grain sorghum hybrid on **in vitro** rate of starch disappearance and finishing performance of ruminants. J. Anim. Sci. 70: 2866-2876.