

**DIGESTIBILIDAD *IN VIVO* DE SILAJES DE TRES HÍBRIDOS DE SORGO
COSECHADOS EN INICIO DE PANOJAMIENTO Y SU COMPARACIÓN CON
ESTIMACIONES DE MÉTODOS INDIRECTOS**

RESSIA, MARÍA AGUSTINA

Trabajo de tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al título de

MAGÍSTER SCIENTIAE EN PRODUCCIÓN ANIMAL

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS- UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA

Lugar de realización: Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Instituto Nacional
Tecnología Agropecuaria.
Chacra experimental Coronel Suárez, Ministerio de Asuntos
Agrarios de la Provincia de Bs. As. Pasman

Balcarce, Argentina.

Junio, 2007

**DIGESTIBILIDAD *IN VIVO* DE SILAJES DE TRES HÍBRIDOS DE SORGO
COSECHADOS EN INICIO DE PANOJAMIENTO Y SU COMPARACIÓN CON
ESTIMACIONES DE MÉTODOS INDIRECTOS**

RESSIA, MARÍA AGUSTINA

Comité consejero

Oscar Di Marco, Ing. Agr., Ph. D.
Director de Tesis

Sonia Arias Ing. Agr., MSc.
Miembro del comité consejero

Martin Arzadun Ing. Agr., MSc.
Miembro del comité consejero

Mario Aello, Ing. Agr.
Miembro del comité consejero

**DIGESTIBILIDAD *IN VIVO* DE SILAJES DE TRES HÍBRIDOS DE SORGO
COSECHADOS EN INICIO DE PANOJAMIENTO Y SU COMPARACIÓN CON
ESTIMACIONES DE MÉTODOS INDIRECTOS**

RESSIA, MARÍA AGUSTINA

Aprobada por

Oscar Di Marco, Ing. Agr., Ph. D.
Director de Tesis

Sonia Arias Ing. Agr., MSc.
Miembro del comité consejero

Martin Arzadun Ing. Agr., MSc.
Miembro del comité consejero

Mario Aello, Ing. Agr.
Miembro del comité consejero

Jorge Carrete Ing. Agr., MSc.
Evaluador Externo

DEDICATORIA

A mis padres, mis héroes (y facilitadores de mis proyectos!!)

A Javi, mi vida (merecedor del título "Doctor en paciencia y apoyo incondicional",
sin sus fuerzas (y soporte agronómico) no lo hubiera logrado)

A mis hermanos, mis guías

AGRADECIMIENTOS

A Oscar, por la oportunidad de trabajar con él, brindarme su tiempo y sus consejos.

A Sonia, por guiarme en mis primeros pasos por la investigación y presentarme a este mundillo. Por compartir sus conocimientos y experiencia. Por su gran generosidad, consejos y principalmente Gracias por brindarme tu amistad.

A Mario, por darme su apoyo, dedicación y tiempo.

A Martin, por facilitarme el uso de las instalaciones de la chacra y por su ayuda en el ensayo *in vivo*, por darme su apoyo y tiempo.

A todo el personal de la Chacra de Pasman, por su amabilidad y cuidados durante mi estadía, y a Cristian por estar siempre atento a las cuestiones del ensayo.

A Gabi, por brindarme su amistad y contención durante el intenso primer año, por su paciencia, buenos consejos y por su buen humor (principalmente por las risas a la 6:30 de la mañana!!). Ah y por cocinarme rico!!.

A los habitantes de la gran casona “El casino”, por esos lindos momentos compartidos y por darme fuerzas: Rosi, Carlis, Maria, Jorge, Mariano (gracias tb por encontrarme trabajo), Juancho, Beto, Daniel, Mariel, Lore, Ingrid, y a Graciela por estar siempre atenta y cuidarnos mucho.

A Pato y Jorge, por su valiosa ayuda con las interminables bolsitas del ensayo in situ.

A mis compañeros y amigos del chincho, por su siempre grata compañía y apoyo: Gabi, Geor (gracias por esas charlas interminables de la ofis, sus valiosos consejos y su ayuda!! y por tratar de rescatarme del casino) y a Joaquín por permitirnos esos recreítos de oficina, a Pato, Jorgelina M., Diego, Jorgelina F., Marcos, Mariano, Nico, Sebas, Feli, Fer, Leo.

A la gente linda de Azul que siempre me alentaron y confiaron en mí: Gracias tíos, primos y amigas (Pau, Sil, Lau, Vero).

A INTA por aceptarme y permitirme terminar el posgrado y a toda la gente de la Experimental Reconquista por su Grato Recibimiento y apoyarme en esta última etapa.

A todos Muchas y Muchísimas Gracias!!!

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis:	4
1.2. Objetivos	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Aspectos generales del cultivo de sorgo	6
2.2. Híbridos de sorgo disponibles para la confección de silajes	7
2.2.1. Generalidades sobre los híbridos de sorgo para silaje	7
2.2.1. Híbridos genéticamente modificados	8
2.3. Definición y características de la lignina	9
2.4. Técnicas para estimar la Digestibilidad	11
2.4.1. Definición de digestibilidad	11
2.4.2. Digestibilidad <i>in vitro</i>	12
2.4.3. Producción de gas <i>in vitro</i>	13
2.4.3.1. Evolución de la técnica	13
2.4.3.2. Características generales de la técnica	14
2.4.3.3. Modelos matemáticos para describir la cinética de producción de gas	17
2.4.3.4. Asociación entre producción de gas y digestibilidad de la MS	21
2.4.4. Degradabilidad <i>in situ</i>	22
2.4.5. Ecuaciones predictivas de la digestibilidad a partir de la composición química	23
2.5. Digestibilidad de distintos híbridos para silajes	24

2.6. Producción de carne y leche con dietas basadas en silaje de maíz y sorgo	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1. Sitio experimental	33
3.2. Cultivos	33
3.2.1. Descripción de los materiales evaluados	33
3.2.2. Siembra de los híbridos	34
3.2.3. Cosecha y confección de silajes	34
3.3. Determinaciones químicas	35
3.4. Digestibilidad <i>in vivo</i> de la MS y de la FDN	36
3.4.1. Animales	36
3.4.2. Procedimiento	36
3.5. Estudios de la digestibilidad con métodos indirectos	37
3.5.1. Degradabilidad <i>in situ</i>	37
3.5.1.1. Animales	37
3.5.1.2. Procedimiento	37
3.5.1.3. Cinética de degradación y Degradabilidad Efectiva de la MS	38
3.5.2. Producción de gas <i>in vitro</i>	40
3.5.2.1. Tratamiento de muestras y medición de la producción de gas	40
3.5.2.2. Modelo utilizado para el estudio de la cinética de producción de gas	40
3.5.2.3. Degradabilidad de la MS <i>in vitro</i> estimada a partir de la producción de gas	41
3.5.3. Ecuaciones predictivas de la digestibilidad de la MS a partir de la composición química del alimento	42
3.6. Diseño experimental y análisis estadístico	42
4. RESULTADOS	45
4.1. Composición química de la MS	45
4.2. Digestibilidad <i>in vivo</i> de la MS y de la FDN	46
4.3. Degradabilidad <i>in situ</i>	47
4.3.1. Cinética de degradación de la MS	47
4.3.2. Degradabilidad efectiva de la MS	49

4.4. Producción de gas <i>in vitro</i>	50
4.4.1. Perfil de producción de gas a través del tiempo	50
4.4.2. Cinética de la producción de gas	52
4.4.3. Degradabilidad <i>in vitro</i> de la MS estimada a partir de la producción de gas	53
4.5. Relación entre producción de gas y degradabilidad <i>in situ</i>	54
4.6. Digestibilidad de la MS estimada a partir de ecuaciones basadas en la composición química del alimento	56
4.7. Comparación de la digestibilidad medida <i>in vivo</i> con las estimaciones de los métodos indirectos	57
5. DISCUSIÓN	60
5.1. Aspectos generales del ensayo	60
5.2. Composición química de la MS	61
5.3. Digestibilidad <i>in vivo</i> de la MS y de la FDN	63
5.4. Degradabilidad <i>in situ</i>	67
5.4.1. Cinética de degradación de la MS	67
5.4.2. Degradabilidad efectiva de la MS	68
5.5. Producción de gas <i>in vitro</i>	70
5.5.1. Perfil de producción de gas a través del tiempo	70
5.5.2. Cinética de la producción de gas	71
5.5.3. Degradabilidad <i>in vitro</i> de la MS estimada a partir de la producción de gas	72
5.6. Relación entre degradabilidad <i>in situ</i> y producción de gas <i>in vitro</i>	74
5.7. Digestibilidad de la MS estimada a partir de ecuaciones basadas en la composición química del alimento	75
6. CONCLUSIONES	77
7. IMPLICANCIAS PRÁCTICAS	78
7. BIBLIOGRAFÍA	80
8. APENDICE	92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Modelos matemáticos utilizados para describir la producción de gas	20
Cuadro 2.2. Valores de digestibilidad aparente <i>in vivo</i> de silajes de sorgo y maíz	27
Cuadro 2.3. Respuesta productiva en animales alimentados con silajes de sorgo o maíz	30
Cuadro 4.1. Composición química (%) de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de sorgo	45
Cuadro 4.2. Peso, consumo y producción de heces de corderos alimentados con silajes de fracción vegetativa de sorgo	46
Cuadro 4.3. Digestibilidad <i>in vivo</i> (%) de la FDN y de la MS silajes de fracción vegetativa de sorgo	47
Cuadro 4.4. Parámetros de la cinética de degradación de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de sorgo	49
Cuadro 4.5. Degradabilidad efectiva (%) de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de sorgo calculada a distintas tasas de pasaje	50
Cuadro 4.6. Producción de gas (ml/g MS incubada) en distintos horarios de incubación de tres silajes de fracción vegetativa de sorgo	51
Cuadro 4. 7. Parámetros de producción de gas (ml/ MS incubada) estimados por los modelos de France et al. (1993) y de Mc Donald (1981)	53
Cuadro 4.8. Degradabilidad <i>in vitro</i> (%), de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de sorgo	54

- Cuadro 4.9.** Digestibilidad (%) de la MS de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo estimada por ecuaciones basadas en la composición química del alimento 57
- Cuadro 4.10.** Comparación de digestibilidad de la MS (%) de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo, estimada a través de diferentes metodologías, dentro de híbrido. 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Patrón de degradabilidad <i>in situ</i> de la MS de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgos	48
Figura 4.2. Tasa de producción de gas <i>in vitro</i> (ml/gMS incubada/h) de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgos	52
Figura 4.3. Relación entre producción de gas <i>in vitro</i> y degradabilidad <i>in situ</i> de la MS de silajes de fracción vegetativa de sorgo. Híbrido granífero; Híbrido azucarado; Híbrido <i>bmr</i>	55
Figura 4.4. Relación entre producción de gas <i>in vitro</i> y degradabilidad <i>in situ</i> de la MS de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgos	56

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estimar la calidad nutritiva (composición química y digestibilidad *in vivo*) de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgo: (granífero: G, silero azucarado: A y silero *bmr*: *bmr*) y comparar la digestibilidad estimada por distintas metodologías (degradabilidad *in situ*, producción de gas *in vitro* y ecuaciones predictivas basadas en la composición química) versus la digestibilidad *in vivo*. La digestibilidad *in vivo* (materia seca: MS y fibra en detergente neutro: FDN) se midió en corderos alojados en jaulas metabólicas. La degradabilidad *in situ* se evaluó en novillos con fístula ruminal. La degradabilidad *in vitro* se estimó a partir de la producción acumulada de gas durante las 72 h de incubación. Se utilizaron las ecuaciones sumativa de Van Soest y la basada en el contenido de fibra en detergente ácido (FDA). Los silajes no se diferenciaron en el contenido de materia orgánica, MS, PB y FDN. El contenido de FDA fue mayor en el híbrido *bmr*, y el contenido de lignina fue mayor en los híbridos G y *bmr*. La digestibilidad *in vivo* de la MS fue similar entre silajes, aunque hubo diferencias pequeñas en la digestibilidad *in vivo* de la FDN. En la comparación entre las estimaciones de digestibilidad por métodos indirectos y la obtenida *in vivo* hubo interacción significativa entre híbrido por técnica, siendo la degradabilidad efectiva al 8%/h la única estimación que no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* en ningún híbrido. La exactitud de los restantes métodos para estimar la digestibilidad *in vivo* dependió del híbrido. Todas las metodologías detectaron diferencias entre híbridos que no fueron observadas *in vivo*.

Palabras clave: silaje de sorgo, digestibilidad *in vivo*, *in situ*, producción de gas, ecuaciones.

Abstract

The objective of this study was to estimate the nutritive quality (chemical composition and *in vivo* digestibility) of stover silages of three sorghum hybrids (grain: G), high sugar: HA and *bmr* double purpose: *bmr*), as well as to compare the digestibility estimated by different techniques (*in situ* degradability, gas production and predictive equations from the chemical composition) versus the *in vivo* digestibility. The *in vivo* digestibility (dry matter: DM and neutral detergent fiber: NDF) was measured on lambs placed in metabolism stalls. The *in situ* degradability was measured using three cannulated steer. The *in vitro* degradability was estimate from the accumulated gas production during 72 h of incubation. The predictive equations used to estimate digestibility were the summative of Van Soest and the based on the content of acid detergent fiber (ADF). No differences were found among silages in organic matter, DM, PC and NDF content. The content of the ADF was higher in the *bmr* and Lignin content was higher in the G and *bmr* hybrids. No difference in *in vivo* digestibility was found between silages, but small differences in the *in vivo* NDF digestibility were found. In the comparison among the *in vivo* digestibility and values estimated by indirect methods occurred significant interaction hybrid x methods, being the ED at 8%/h the only estimation that did not differ from the *in vivo* digestibility in any hybrid. The accurate to the other indirect methods for estimation *in vivo* digestibility depend on hybrid. All techniques detected hybrid differences that were not observed *in vivo*.

Key words: sorghum silage, *in vivo* digestibility, *in situ*, gas production, equations.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de silaje de planta entera de sorgo, como suplemento energético para el ganado, está en aumento en la Argentina, especialmente en aquellas zonas que presentan condiciones edafoclimáticas limitantes para el cultivo de maíz. Ello se debe a que en esas zonas este cultivo tiene grandes ventajas con respecto al maíz (Lusk et al., 1984; Nichols et al., 1998) debido a que presenta una alta eficiencia en el uso del agua (Miron et al., 2005), tiene mayor capacidad de absorción del agua del suelo y, además, puede permanecer en estado de latencia durante períodos de sequía prolongados (Torrecilla et al., 2001).

Existen en el mercado numerosos genotipos de sorgo que se diferencian en producción de materia seca (MS) y en la proporción de los componentes morfológicos de la planta como hoja, tallo y panoja. La proporción de panoja puede variar desde valores inferiores a 20% en los híbridos forrajeros (Bruno et al., 1992) hasta 30-50% en los graníferos (Díaz et al. 2003; Freddi et al., 2005). Los híbridos sileros presentan una producción de grano intermedia, junto a una mayor producción de biomasa que los graníferos (Molina, 2002). Además de estas diferencias, también hay híbridos que poseen el gen nervadura marrón, el cual reduce el contenido de lignina y en consecuencia tienen mayor digestibilidad de la fracción vegetativa (Porter et al., 1978, Lusk et al., 1984; Krause et al., 2003). Si bien existen las diferencias mencionadas entre híbridos en producción de grano es importante puntualizar que la fracción vegetativa es el principal componente de la planta y por lo tanto representa la mayor proporción del material ensilado.

Es conocido que el grano es un componente de alta calidad, siendo la digestibilidad del almidón mayor al 90% (Hart, 1990; Nichols et al.; 1998; Andrae et al., 2001), mientras que la fracción vegetativa es un componente de calidad más variable (Tolera, Sundstøl y Said, 1998; Tolera y Sundstøl, 1999; Martins et al., 2003) que depende de la tasa de digestión y del tiempo que el silaje permanece en el rumen.

El principal parámetro que define la calidad de un recurso forrajero es la digestibilidad, la cual determina la concentración de energía metabolizable (AFRC, 1993) y el consumo de MS (Minson, 1990). La digestibilidad se puede estimar con animales (*in vivo*) o con métodos indirectos. La metodología *in vivo* es laboriosa, requiere mucho tiempo y gran cantidad de recursos económicos y humanos, por lo que es utilizada solamente con fines experimentales (Adesogan, 2002). Debido a estas dificultades, en evaluaciones de rutina se utilizan técnicas indirectas que permiten realizar las evaluaciones con mayor rapidez, con pequeña cantidad de muestra y con bajo costo. Es por ello que la mayor parte de la información disponible sobre digestibilidad de silajes ha sido obtenida con métodos indirectos, entre los cuales se destaca la digestibilidad *in vitro* de Tilley y Terry (1963).

La técnica *in vitro* de Tilley y Terry (1963) requiere de 48 h para la etapa de incubación con líquido ruminal y no provee información sobre la cinética de la digestión. La técnica *in situ* de Mehrez y Ørskov (1977) supera ésta limitante permitiendo estudiar la extensión y la cinética de degradación del alimento. El problema de esta metodología es que requiere animales con fístula ruminal para incubar las muestras a evaluar. También se utiliza la metodología de producción de gas *in vitro* (Theodorou et al., 1994) la cual, de manera rápida y sencilla, permite estudiar la cinética de degradación del sustrato, a través del volumen de gas producido durante el proceso fermentativo. Debido a sus características está siendo ampliamente adoptada tanto en los trabajos de investigación como en análisis de rutina de

evaluación de alimentos. Finalmente se encuentran las ecuaciones empíricas de predicción de la digestibilidad, las cuales estiman la digestibilidad a partir de la composición química y son ampliamente utilizadas por los laboratorios de nutrición (Weiss, 1993). Entre ellas se encuentra la ecuación sumativa de Van Soest (1967) y la ecuación empírica de Rohweder, Barnes y Jorgensen (1978). Estas ecuaciones se diferencian en que la primera estima la digestibilidad a partir de los componentes solubles y los de la pared celular, mientras que la segunda se basa únicamente en la fibra detergente ácida (FDA).

Trabajos realizados en el país muestran que la digestibilidad *in vivo* del silaje de maíz es sobreestimada por la técnica *in vitro* de Tilley y Terry (1963) en aproximadamente 15% (Nomdedeu, 2000), y que se relaciona mejor con la degradabilidad *in situ* a las 24 h (Di Marco et al., 2005). Dicha sobreestimación puede estar ocasionada por el bajo tiempo de permanencia del silaje en el rumen, que sería menor a las 48 h utilizadas en la técnica *in vitro*. Al respecto Kuehn et al. (1999) midieron una tasa de pasaje en vacas lecheras consumiendo silaje de maíz de 4 a 5%/h. Esta tasa de pasaje es equivalente a un tiempo de permanencia de las partículas del silaje en el rumen inferior a 24 h, lo cual es importante tener en cuenta cuando se evalúa este tipo de alimento *in situ* o *in vitro*.

En cuanto al silaje de sorgo cabe destacar que no se han realizado ensayos de digestibilidad *in vivo* en el país y que existen escasos trabajos en la bibliografía extranjera. Los valores promedio de digestibilidad *in vivo*, citados en la bibliografía, son del 55%. De hecho, Lusk et al. (1984) menciona valores de digestibilidad *in vivo* de 53% en sorgos no mutantes y de 58% en híbridos *bmr*, mientras que Schmid et al. (1976) evaluando 14 genotipos de sorgo obtuvieron un valor de digestibilidad promedio de 56% con valores máximos de 60% y mínimos de 49%. La baja digestibilidad de los sorgos en parte se debería a la compleja estructura de la pared celular de las

gramíneas C4 que dificulta el ataque microbiano (Buxton y Redfearn, 1997), y al efecto negativo que puede tener el contenido de grano sobre la digestibilidad de la misma (Mertens y Loften, 1980; Mertens y Ely 1982; Hart, 1987).

En síntesis se puntualiza que la fracción vegetativa es un importante componente de la planta de sorgo y, en consecuencia, forma parte de una gran proporción del material a ensilar. La digestibilidad de esta fracción puede estar afectada por la compleja estructura de la pared celular y por el contenido de almidón del silaje. Además, es escasa la información existente sobre digestibilidad *in vivo* de silajes de sorgo, así como también de la relación de estimaciones de metodologías indirectas con la técnica *in vivo*. Por lo tanto, este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de medir la digestibilidad del silaje de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgo (graníferos, silero azucarado y silero *bmr*) con los métodos *in vivo*, *in situ*, *in vitro* por producción de gas y con las ecuaciones predictivas basadas en la composición química.

Hipótesis:

- I. El contenido de FDN, FDA y Lignina del silaje de fracción vegetativa de híbridos de sorgo es diferente si se utiliza un híbrido *bmr*, un azucarado o un granífero.
- II. La digestibilidad *in vivo* de la MS del silaje de fracción vegetativa de híbridos de sorgo disminuye en el siguiente orden: *bmr*, silero azucarado y granífero.
- III. La digestibilidad *in vivo* de la FDN del silaje de fracción vegetativa de sorgo es: mayor con un híbrido *bmr*, intermedia con un híbrido silero azucarado y menor con un híbrido granífero.

IV. Los métodos indirectos: *in situ*, *in vitro* por producción de gas y las ecuaciones predictivas basadas en la composición química estiman valores similares a la digestibilidad *in vivo* en silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Objetivo general:

Estimar la digestibilidad *in vivo* de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgo (granífero, silero y silero *bmr*) y compararla con la estimada por metodologías indirectas.

Objetivos particulares:

- 1) Medir la composición química y la digestibilidad *in vivo* de la MS y de la FDN del silaje de los tres híbridos.
- 2) Estimar:
 - a) degradabilidad *in situ* de la MS
 - b) producción de gas *in vitro*
 - c) degradabilidad *in vitro* a través de la producción de gas *in vitro*
 - d) digestibilidad con ecuaciones predictivas a partir de distintos componentes químicos.
- 3) Comparar la digestibilidad *in vivo* con las estimaciones indirectas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos generales del cultivo de sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor*) pertenece a la familia de las gramíneas y tiene su centro de origen y de mayor diversidad en los trópicos semiáridos del centro este africano. Este cultivo comienza a expandirse rápidamente a partir del desarrollo de semilla híbrida, con un alto nivel de heterosis que permitió obtener buenos rendimientos y uniformidad del cultivo. En 1956 comenzó la distribución de esta semilla que llega a la Argentina en 1957 (Giorda et al., 2004).

En Argentina, la zona ecológica apta para el cultivo de sorgo se extiende aproximadamente entre los 22° y 40° de latitud sur, siendo delimitada hacia el oeste por la isohieta de 500 mm de precipitación anual. El límite austral estaría dado por un período libre de heladas de 180 días y la isoterma media anual de 14°C (Giorda et al., 1997). Sin embargo, en la actualidad el área de siembra de este cultivo se está desplazando hacia zonas de menor aptitud edafo-climáticas.

La importancia del sorgo como forraje está creciendo en varias regiones del mundo debido a su alta productividad y su capacidad para utilizar eficientemente el agua aún bajo condiciones de sequía (Sánchez et al., 2002). Además, puede permanecer en estado de latencia durante períodos de sequía prolongados y posee un bajo costo de implantación (Torrecilla et al., 2001). En la actualidad este cultivo está siendo ampliamente utilizado para la confección de silajes de planta entera en los sistemas lecheros y de producción carne, principalmente en aquellos ubicados en áreas donde

el cultivo de maíz no puede expresar su potencial productivo por las características edafo-climáticas (Bruno et al., 1992).

La mayor eficiencia de utilización y mayor capacidad de absorción de la humedad del suelo del sorgo, con respecto al maíz, se debe a que la planta posee adaptaciones morfológicas especiales (Grant et al., 1995; Torrecilla et al., 2001). Por ejemplo, tiene menor número y tamaño de estomas y los mismos se encuentran en mayor proporción en la cara inferior de la hoja (abaxial); posee a lo largo de la nervadura central células motoras que producen el “acartuchamiento” de las hojas en las horas del día de mayor temperatura, reduciendo la superficie de evapotranspiración y, en consecuencia, la pérdida de agua; presenta raíces fibrosas con capacidad de absorber agua en suelos secos y un gran desarrollo del sistema radical que le permite explorar y penetrar horizontes densos y/o compactos (Centeno, 2001).

2.2. Híbridos de sorgo disponibles para la confección de silaje

2.2.1. Generalidades sobre los híbridos de sorgo para silaje

El desarrollo de nuevos híbridos de sorgo con mayor potencial de rendimiento ha sido un proceso continuo. Sin embargo, esta tendencia no se ve reflejada en los rendimientos promedios obtenidos en los últimos años en las distintas regiones sorgueras del país, lo cual se debe principalmente a problemas relacionados con el manejo del cultivo (Giorda, 1997).

Los genotipos de sorgos difieren fundamentalmente en su capacidad de producción de grano y en la concentración de carbohidratos solubles en el tallo (Serafim et al., 2000). Estas características determinan diferente dinámica y

acumulación de carbohidratos solubles en la planta. Los híbridos graníferos destinan la mayor parte de los fotoasimilados hacia los granos aumentando su proporción en la planta y disminuyendo la calidad de la fracción fibrosa (Cummins, 1981). Por el contrario, algunos autores postulan que los híbridos forrajeros, con baja o nula producción de grano, tienden a aumentar la calidad de la fracción fibrosa con la madurez, principalmente por una mayor calidad del tallo (Cummins, 1981).

Los genotipos de sorgo disponibles en el mercado se diferencian principalmente en la proporción de los componentes morfológicos de la planta: hoja, tallo y panoja. La producción de panoja es nula en los híbridos fotosensitivos y puede variar desde valores inferiores a 20% en los híbridos forrajeros (Bruno et al., 1992; Miron, et al., 2005) hasta 30-50% en los graníferos (Díaz et al., 2003; Freddi et al., 2005). Los híbridos sileros presentan una producción de grano intermedia junto a una gran producción de biomasa que puede superar a los graníferos (Molina et al., 2002).

2.2.2. Híbridos genéticamente modificados

Entre los híbridos genéticamente modificados se encuentran las variedades con el gen *bmr*. Porter et al. (1978), en una revisión sobre el tema, mencionan que en 1931 Jorgensen describió la presencia de pigmentación marrón en nervaduras de hojas, tallos, panojas y raíces de plantas de maíz con este gen y que, posteriormente, fueron identificados cuatro genes *bmr* (*bmr1*, *bmr2*, *bmr3* y *bmr4*). Más tarde Kuc y Nelson (1964) y Gee et al. (1968) (citados por Porter et al., 1978), fueron los primeros en demostrar que las plantas de maíz con este gen contenían menos lignina que las plantas normales.

Porter et al. (1978) también estudiaron esta característica en plantas de sorgo con mutaciones inducidas y encontraron una reducción promedio en el contenido de lignina de 32 y 15% en tallos y hojas, respectivamente. Estos autores notaron que si bien todas las plantas mutantes tenían pigmentación marrón, algunas no presentaron una disminución en el contenido de lignina, por lo que sugirieron la presencia de diferentes genes *bmr*.

La disminución en el contenido de lignina y/o los cambios químicos en sus componentes están asociados al aumento de la digestibilidad de la pared celular (Krause et al., 2003) y, por lo tanto, mayor digestibilidad *in vitro* de la fracción vegetativa (Porter et al., 1978; Lusk et al., 1984; Cherney et al., 1986; Casler et al., 2003).

2.3. Definición y características de la lignina

La composición y estructura de la pared celular son importantes factores que influyen en la utilización de los forrajes en la dieta por los rumiantes (Cherney et al., 1986; Fritz, Moore y Master, 1990). La lignina es el principal constituyente de la pared celular que limita la digestión de los polisacáridos de la misma: celulosa y hemicelulosa (Jung, 1989; Jung y Allen, 1995; Grant et al., 1995; Van Soest, 1993). Ello se debe principalmente a la fuerte asociación física de la lignina con los polisacáridos dentro de la matriz de la pared celular, y a las uniones covalentes éster y éter de este compuesto con los polisacáridos que limitan la accesibilidad a la pared celular de las enzimas microbianas del rumen que realizan la degradación (Grant et al., 1995).

La lignina es un polímero de alcoholes cuyos precursores más importantes son el p-cumaril, coniferil y sinapil (Jung y Allen, 1995). La lignificación se produce por sucesivas deposiciones de los polímeros en la pared celular hasta formar un compuesto en el cual los polímeros son unidos unos con otros de manera física y química. Este proceso comienza en la pared primaria, sigue por la laminilla media y termina en la pared secundaria. Estas diferencias en la deposición causan heterogeneidad en la estructura de la lignina dependiendo de las regiones morfológicas (Terashima et al., 1993).

Durante la maduración de la pared celular la composición de la lignina cambia desde el tipo guaiacil (predomina el alcohol coniferil) hacia el tipo siringil (predomina el alcohol sinapil) (Akin y Chesson, 1989; Terashima et al., 1993; Jung y Allen, 1995). Las unidades guaiacil pueden formar más enlaces con los polisacáridos que las unidades de sinapil. Esto genera una mayor relación lignina/polisacáridos en la pared primaria y laminilla media que en la pared celular secundaria, donde la lignina es más rica en unidades de siringil. En consecuencia la lignina formada durante estados tempranos (rica en guaiacil) es más condensada y más inhibitoria de la hidrólisis de los polisacáridos de la pared celular que la formada más tardíamente (Terashima et al., 1993; Jung y Deetz, 1993). Este mecanismo de biogénesis es un importante factor que determina las propiedades físicas y químicas de la lignina (Terashima et al., 1993).

Los ácidos fenólicos ferúlico (AF) y p-cumárico (APC) juegan un rol muy importante en la formación de la lignina. Por un lado, estos ácidos que se depositan durante la formación de la pared primaria y secundaria son los precursores junto al ácido sinápico de los alcoholes: p-cumaril, coniferil y sinapil (Ralph y Helm, 1993). Por otro lado, el AF y el APC pueden estar unidos a la lignina o a los polisacáridos de la pared ó a ambos generando una cerrada asociación física entre estos compuestos. Como resultado la

lignina es inaccesible y no puede ser removida por las enzimas de los microorganismos ruminales (Jung y Deetz, 1993).

El APC es más inhibidor de la degradación de la pared celular que el AF (Buxton, 1988; Fritz et al., 1990), debido a que estos ácidos son esterificados con diferentes polímeros de la pared celular (Jung y Deetz, 1993). La mayor concentración de p-cumárico y relación APC:AF en tallos está asociada con la menor digestión de los mismos cuando son comparados con las hojas (Fritz et al., 1990).

Las plantas mutantes *bmr* pueden presentar un menor contenido de lignina o que la misma este químicamente alterada con respecto a las plantas normales (Cherney et al., 1986; Krause et al., 2003). Un ejemplo de la modificación en la composición de la lignina generada por la mutación *bmr* es la disminución de la cantidad de ácido p-cumárico mientras que el contenido del ácido ferúlico se mantiene constante. Esto determina que la relación APC:AF en estos híbridos mutantes sea menor que en los híbridos normales (Cherney et al., 1986; Akin y Chesson, 1989; Fritz et al., 1990).

2.4. Técnicas para estimar la digestibilidad

2.4.1. Definición de digestibilidad

El valor nutritivo de los forrajes es principalmente función de la digestibilidad del mismo (Lechtenberg et al., 1972). Por lo tanto, la calidad de un alimento se mide en términos de digestibilidad, que determina la concentración de energía metabolizable y el consumo de MS (AFRC, 1993).

La digestibilidad aparente *in vivo* se calcula a partir de la diferencia entre la cantidad consumida de alimento y lo excretado en heces. Se obtiene a partir de ensayos con animales donde se mide exactamente las cantidades de forraje consumido y de las heces producidas, para lo cual se utilizan arneses especiales o jaulas metabólicas, durante un período de tiempo preestablecido (Minson, 1990). Esta metodología es laboriosa, requiere de tiempo y de gran cantidad de recursos económicos y humanos, por lo que es utilizada solamente con fines experimentales (Adesogan, 2002; Siciliano-Jones, 2002).

Debido a las dificultades que presenta la medición de la digestibilidad *in vivo*, se utilizan diversas técnicas indirectas para estimarla, entre las cuales se encuentran las técnicas de digestibilidad *in vitro*, la degradabilidad *in situ* y las ecuaciones de predicción a partir de la composición química del forraje (Adesogan, 2002).

2.4.2. Digestibilidad *in vitro*

Entre las metodologías *in vitro* la más utilizada es la técnica de dos etapas de Tilley y Terry (1963). Esta consiste en una fermentación inicial de la muestra con microorganismos ruminales junto a una solución buffer y en condiciones anaeróbicas durante 48 h, etapa I que simula la digestión ruminal, y una segunda etapa, que simula la digestión postruminal, donde el residuo de la etapa anterior se trata con pepsina ácida durante otras 48 h. El residuo resultante representa la fracción indegradable. Otra técnica *in vitro* consiste en la utilización de enzimas en lugar de microorganismos, cuya principal ventaja es que no requiere de animales como donadores de inóculo.

Estas técnicas tienen la limitante de estimar la digestibilidad final del sustrato y no proveen información sobre la cinética de digestión (Getachew et al., 1998). Expresiones cuantitativas de la cinética de digestión son necesarias para estimar de una manera más precisa la cantidad de nutrientes digeridos y las propiedades intrínsecas de éstos que limitan su disponibilidad para los rumiantes (López et al., 1998).

2.4.3. Producción de gas *in vitro*

Existe un renovado interés en la medición de la producción de gas debido a que es un método rápido que permite evaluar simultáneamente gran cantidad de muestras, estima con mayor precisión la fracción soluble del alimento y es menos dependiente del animal que la técnica *in situ* (Valentin et al., 1999; De Boever et al., 2005). Asimismo permite el estudio de la extensión y cinética de degradación del alimento a través del volumen de gas producido durante el proceso fermentativo (Dhanao et al., 2000). A continuación se detallan los factores más relevantes de esta técnica.

2.4.3.1. Evolución de la técnica

Rymer et al. (2005) mencionan en una revisión sobre esta técnica, que McBee (1953) y Hungate (1966) fueron los primeros en desarrollar el principio de estimar la degradación ruminal potencial del alimento a través de la producción de gas en muestras incubadas con licor ruminal. A partir de ese momento, la técnica fue modificada por distintos investigadores. Por ejemplo, Trei et al. (1970) instalaron un

manómetro en cada recipiente de incubación para medir la producción de gas. Posteriormente Menke et al. (1979) desarrollaron un sistema de jeringas graduadas que mide el volumen de gas producido a través del desplazamiento de un pistón dentro de las jeringas durante un período de 96 h. Este sistema fue modificado por Theodorou et al. (1994) quienes propusieron el reemplazo de las jeringas por botellas cerradas en los que se mide el gas producido con un medidor de presión.

Esta técnica fue desarrollada originalmente para determinar la fermentación total a un horario final (Rymer et al., 2005), sin embargo, se han desarrollado diferentes métodos para la evaluar la producción de gas a través del tiempo que permiten obtener importante información sobre la cinética de la digestión de los alimentos (Schofield et al., 1994; Beuvinck y Kogut, 1993; France et al., 2005).

2.4.3.2. Características generales de la técnica

Las muestras de alimento se incuban con licor ruminal y una solución buffer a una temperatura constante de 39°C (Menke et al., 1979). La muestra es degradada y fermentada produciendo ácidos grasos volátiles (AGV), acético, propiónico y butírico principalmente, y generando gas (CO_2 , CH_4 y H_2) (Theodorou et al., 1994; Getachew et al., 2004; Rymer et al., 2005). Esta técnica se basa en la medición del gas proveniente directamente de la fermentación y del CO_2 que es liberado cuando los AGV reaccionan con el medio buffer de bicarbonato (Getachew et al., 1998). Por lo tanto, la producción de gas ocurre simultáneamente a la fermentación y en proporción a la digestión de la muestra (Schofield, Pitt y Pell, 1994).

La fermentación del sustrato hasta propionato produce gas solo indirectamente a partir de la neutralización del ácido, en consecuencia la producción de gas generada en esta reacción es menor que en las fermentaciones orientadas hacia acetato (Wolin, 1960; Getachew et al., 1998; 2004). Es decir que cuando en la fermentación se produce acético, por cada mol producido se genera también 1 mol de CO₂, pero cuando se produce propionato no se genera CO₂ (Pell et al., 1997). Por lo tanto, las modificaciones en la proporción molar de AGV pueden ser reflejadas en cambios en la producción de gas (Getachew et al., 1998) y pueden afectar la relación entre gas producido y degradabilidad del sustrato (Pell et al., 1997).

Los sistemas utilizados para medir la producción de gas se dividen en los que miden el volumen de gas producido a presión constante y los que miden la producción de gas manteniendo un volumen constante. El primer sistema tiene la ventaja de ser económico, pero es menos sensible. En el segundo sistema la presión se acumula en los recipientes y su medición a diferentes intervalos de tiempo permite obtener el perfil de producción de gas. Un inconveniente de mantener el volumen constante es que la presión aumente de forma tal que pueda afectar la solubilidad de los gases producidos. Existe un tercer sistema que mide la producción de gas a presión y volumen constante por medio de manómetros o sensores que pueden ser de operación manual, semiautomáticos o totalmente automáticos (Rymer et al., 2005; Posada y Noguera, 2005).

Las adaptaciones y modificaciones de esta técnica en varios laboratorios ha resultado en una amplia variedad de metodologías y aparatos para medir la producción de gas (Rymer et al., 2005). De hecho, en un estudio comparativo en el que participaron laboratorios de distintas partes del mundo se encontró que, aún cuando todos los laboratorios utilizaron la misma técnica de Menke y Steingass (1988)

para estimar la producción de gas, solo la mitad de ellos fueron capaces de reproducir los valores de referencia (Getachew et al., 2002).

Entre los factores que afectan en gran medida la producción de gas se encuentran:

- 1) la composición del medio utilizado: es importante que la capacidad buffer del medio sea apropiada para la cantidad de alimento utilizado ya que debe ser capaz de neutralizar los ácidos grasos producidos durante la fermentación manteniendo constante el pH (Rymer et al., 2005);
- 2) la cantidad de sustrato: se debe utilizar una cantidad apropiada de material para minimizar los errores experimentales asociados con la pesada (Rymer et al., 2005);
- 3) la fuente de inóculo: es considerado por distintos autores como el principal factor, debido a las diferencias en el número y tipo de especie de microorganismo entre diferentes licores ruminales (Schofield y Pell, 1995; Getachew et al., 2002; Van Gelder et al., 2005).

Sin embargo, las fuentes de variación pueden ser corregidas con el uso de muestras estándares en cada corrida (Menke et al., 1979; Van Gelder et al., 2005). Es importante destacar que la sola medición de la producción de gas no estima la digestibilidad del alimento, sino que la misma debe ser complementada con la determinación del peso del residuo (Getachew et al., 1998).

Con respecto a la fuente de de inóculo, varios autores mencionan que se debe identificar un inóculo alternativo al licor ruminal como fuente de microorganismos, debido que la intervención quirúrgica para preparar animales con fístula ruminal es un procedimiento invasivo que está siendo cuestionado por consideraciones éticas (Mauricio et al., 1999). Experimentos realizados por Mauricio et al. (1998; 2001) con el

fin de comparar líquido ruminal y heces como fuente de inóculo, mostraron que con las heces se obtuvieron mayores tiempos de colonización y menor fermentación, debido posiblemente a que la actividad microbiana es menor que en el líquido ruminal. Una alternativa a evaluar sería el uso de mayor cantidad de inóculo fecal o más concentrado (Mauricio et al., 2001).

2.4.3.3. Modelos matemáticos para describir la cinética de producción de gas

La descripción matemática de las curvas de producción de gas permite el análisis de los datos con el fin de comparar sustratos y evaluar diferentes ambientes de fermentación (Beuvink y Kogut, 1993; Noguera, Saliba y Mauricio, 2004; France et al., 2005).

Varios modelos han sido propuestos para describir la cinética de producción de gas, todos presentan ventajas y desventajas y su elección depende principalmente del tipo de sustrato en estudio (Dhanoa et al., 2000). En general, las curvas de producción de gas presentan forma sigmoideal y en ellas pueden distinguirse tres fases. Una fase inicial de baja o nula producción de gas que se denomina fase lag, en la cual la pendiente de los perfiles tiende a ser cero. Una segunda fase exponencial de rápida producción de gas y la tercera donde la disminución del sustrato hace que el perfil se aproxime a una asíntota donde nuevamente la producción de gas es lenta y casi nula (Noguera et al., 2004; France et al., 2005).

Entre los modelos descritos en la bibliografía se encuentran los siguientes: McDonald (1981), France (1993), Logístico propuesto por Schofield et al. (1994) y Gompertz propuesto por Lavrencic, Stefanon y Susmel (1997).

El modelo exponencial de McDonald (1981) es ampliamente usado en la técnica *in situ* para describir la cinética de degradación (Beuvink y Kogut, 1993). Varios autores han adoptado éste modelo también para describir la cinética de producción de gas (Tolera et al., 1998; Valentin et al., 1999; Garcia-Rodríguez et al., 2005). En el mismo se asume que la tasa de producción de gas depende únicamente del sustrato disponible para la fermentación una vez alcanzado el tiempo de colonización. Dado que algunas partículas de los alimentos son fermentadas a distintas tasas, la utilización de este modelo no es universalmente válida (Getachev, et al. 1998).

El modelo desarrollado por France et al. (1993) es un modelo empírico semejante al modelo exponencial propuesto por McDonald (1981), que conserva el concepto de tiempo de colonización antes de comenzar la degradación y considera que la tasa de degradación varía con el tiempo de incubación.

El modelo logístico propuesto por Schofield et al. (1994) asume que la producción de gas es proporcional a la cantidad de la población microbiana y del sustrato digestible y surge a partir de la combinación de dos modelos simples. Uno considera que la tasa de producción de gas es proporcional a la masa microbiana e independiente del sustrato y el otro considera que la producción de gas es proporcional al nivel de sustrato pero independiente de la masa microbiana (Schofield et al., 1994).

El modelo Gompertz, propuesto por Lavrencic et al. (1997), asume que la tasa de producción de gas es proporcional a la actividad microbiana, pero la proporcionalidad disminuye con el tiempo de incubación, lo que puede ser atribuido a la pérdida de eficiencia en la tasa de fermentación con el tiempo (Beuvink y Kogut, 1993). Es decir, considera que la tasa de degradación varía con el tiempo. Esta ecuación permite

evaluar la extensión de la degradación ruminal relacionando así la técnica de producción de gas (France et al., 2005).

Los modelos logísticos y Gompertz difieren principalmente en que el primero asume que el crecimiento microbiano depende del sustrato en forma lineal, a diferencia del segundo que considera una dependencia logarítmica (Schofield et al., 1994).

El modelo exponencial mostró un ajuste inferior cuando fue comparado con los modelos sigmoides (Beuvink y Kogut, 1993; France et al., 1993; Dhanoa et al., 2000). Este modelo asume que después de un lag time el alimento es fermentado instantáneamente a la máxima tasa, mientras que la producción de gas es proporcional al crecimiento de las bacterias y, por lo tanto, la curva de producción de gas se asemeja a la curva de crecimiento sigmoideal de las bacterias (Beuvink y Kogut, 1993).

Noguera et al. (2004) evaluaron distintos modelos buscando determinar su capacidad de ajuste para describir la cinética de producción de gas de genotipos de sorgo y encontraron que el modelo de France et al. (1993) subestima la producción de gas en los primeros horarios de incubación y no ofrece un adecuado ajuste para la fase exponencial. Por el contrario, el modelo logístico sobreestima la producción de gas en los primeros horarios de incubación y se ajusta mejor a la fase asintótica de la curva. En el Cuadro 2.1 se muestran las ecuaciones correspondientes a cada de estos modelos.

Cuadro 2.1. Modelos matemáticos utilizados para describir la producción de gas *in vitro*.

Modelo	Nº. de parámetros	Ecuación
Exponencial	3	$V_T = SV_{F_n} \times (1 - \exp^{-k_n \times (t - L_n)})$
Logístico	3	$V_T = SV_{F_n} \times (1 + \exp^{(2 - 4 \times S_n \times (t - L_n))})^{-1}$
France	4	$V_T = V_{F_n} \times \{1 - \exp^{[-b \times (t - L) - c \times (\sqrt{t} - \sqrt{L})]}\}$
Gompertz	3	$V_T = V_{F_n} \times \exp(-c) \times (\exp(-A \times t))^c$

V_T = volumen de gas en el-tiempo; V_{F_n} = volumen de gas correspondiente a la completa digestión del sustrato (asíntota); k_n = tasa constante (h^{-1}); L , L_n = tiempo de colonización; S_n , b = representan una tasa específica semejante a la tasa de degradación k_n ; c = tasa constante de producción de gas del material potencialmente degradable. A = factor constante de eficiencia microbiana; t = tiempo

(extraído de Noguera et al., 2004)

2.4.3.4. Asociación entre producción de gas y digestibilidad de la MS

Menke et al. (1979) evaluando diferentes alimentos indicaron que la técnica de producción de gas está altamente correlacionada con la digestibilidad *in vivo*. Estos autores sugirieron un tiempo de incubación de 24 h para alimentos con una tasa de pasaje media y un tiempo mayor para los alimentos de menor tasa de pasaje, como por ejemplo los henos. El tiempo de incubación de 24 h sería el apropiado para evaluar a los silajes ya que la tasa de pasaje de los mismos es de 4 a 5% (Kuehn et al., 1999).

En silajes de sorgo, Mauricio et al. (2003) encontraron que esta técnica estima de forma precisa la digestibilidad *in vivo* y además provee información adicional sobre la cinética de fermentación ruminal. Contrariamente, Adesogan, Owen y Givens (1998) mencionan que en silajes de planta entera de trigo la técnica de producción de gas no predijo satisfactoriamente la digestibilidad *in vivo*. Estos autores atribuyeron las diferencias a que esta técnica simula únicamente la digestión ruminal.

La predicción de la digestibilidad *in vitro* a partir de la producción de gas fue mejorada con la inclusión del contenido de proteína bruta (PB), carbohidratos solubles ($100 - (PB + FDN + \text{grasa} + \text{cenizas})$) y grasa en la ecuación de regresión. Por lo tanto esta técnica se debería completar con análisis de composición química de los alimentos para aumentar la exactitud de la predicción de digestibilidad y producción de ácidos grasos volátiles a partir de la producción de gas (Getachew et al., 2004).

2.4.4. Degradabilidad *in situ*

La técnica *in situ* ha sido utilizada por varios años para proveer de estimaciones de la tasa y de la extensión de la degradación de los alimentos (Getachew et al., 1998). Tiene como objetivo principal medir la desaparición de la materia seca u orgánica de los alimentos, como así también de sus componentes como proteína o pared celular, cuando son expuestos a las condiciones ruminales. Para ello los alimentos son colocados en bolsitas porosas que se incuban en el rumen a través de una fístula permanente en el saco dorsal de este órgano.

El tamaño de los poros de la bolsita debe permitir la entrada del líquido ruminal y de los microorganismos a la vez que debe evitar las pérdidas de material sin degradar. La incubación de las bolsitas en distintos horarios proporciona importante información sobre la cinética de la degradación del alimento (Adesogan, 2002; Pedraza Olivera, 2001).

Existen distintos modelos matemáticos para analizar los datos de desaparición *in situ*. Los más utilizados son los modelos de Ørskov y McDonald (1979) y el de McDonald (1981), que se diferencia del anterior por considerar un tiempo de retardo antes de comenzar la degradación de la fibra. Strizler et al. (1997) analizaron varios modelos matemáticos y concluyeron que todos ellos estiman con similar precisión la degradabilidad ruminal del alimento, pero puede obtenerse más información si se procesan los datos utilizando el modelo propuesto por McDonald (1981).

Vazant et al. (1998) mencionan, en una revisión sobre esta metodología, que varios factores pueden influir sobre la estimación de la degradación ruminal y que los mismos deberían ser estandarizados para minimizar las fuentes de variabilidad de esta técnica. Entre los factores están: 1) cantidad y manejo de la muestra a ser incubada;

2) tamaño y material de la bolsita de incubación; 3) tamaño de poro de la bolsita; 4) dieta, nivel y frecuencia de alimentación del animal; 5) horarios de incubación; 6) ubicación de las bolsitas en el rumen; 7) modelos matemáticos para describir la cinética de la digestión y 8) número de animales, bolsitas y días.

Esta técnica es cuestionada por varios autores porque consideran que existen importantes pérdidas de partículas a través de los poros de las bolsitas, que hacen que la degradación sea sobrestimada (Adesogan et al., 1998; Dhanoa et al., 1999; Valentin et al., 1999). De todas maneras, los nuevos programas de evaluación de raciones requieren información detallada sobre la cinética de digestión de las diferentes fracciones del alimento, lo que hace necesario refinar los métodos para obtener la información solicitada. A su vez, el incremento de la importancia de los silajes de planta entera en la nutrición animal remarca la necesidad de desarrollar y ajustar las técnicas para lograr una predicción exacta de la digestibilidad y validarlas con ensayos *in vivo* (García-Rodríguez et al., 2005).

El desafío de las técnicas de evaluación de alimentos es cuantificar lo más fielmente posible el resultado del proceso de digestión de los alimentos dentro del animal. Para ello las técnicas *in situ* y de producción de gas *in vitro*, a pesar de sus limitaciones, siguen siendo una valiosa herramienta disponible para su uso en la nutrición animal (Pedraza Olivera, 2001).

2.4.5. Ecuaciones predictivas de la digestibilidad a partir de la composición química

Las ecuaciones predictivas de digestibilidad son una alternativa para evaluar rápidamente alimentos en los laboratorios comerciales de nutrición. Estas ecuaciones

estiman la digestibilidad del alimento a partir de sus componentes químicos o de los constituyentes de la pared celular (Weiss, 1993). Entre las más utilizadas se encuentran la ecuación sumativa de Van Soest (1967) y la ecuación empírica de Rohweder et al. (1978). La ecuación sumativa estima la digestibilidad a partir del contenido celular, al cual se le asigna un valor de digestión fijo del 98%, y de la cantidad de pared celular, cuya digestión depende del grado de lignificación de la FDA (fibra detergente ácido). Es decir que esta ecuación considera tanto los componentes solubles como los de la pared celular, mientras que la ecuación empírica se basa únicamente en el contenido de FDA.

La ecuación de Rohweder et al. (1978) es utilizada por la National Forage Testing Association (NFTA) en los reportes de los laboratorios de nutrición en los Estados Unidos (Moore y Undersander, 2002). Sin embargo, varios investigadores han demostrado que la relación entre la digestibilidad del forraje y el contenido de FDA varía considerablemente. Asimismo, forrajes con el mismo contenido de FDA puede tener distinta digestibilidad (Siciliano-Jones, 2001).

2.5. Digestibilidad de distintos híbridos para silajes

Según Ballard et al. (2001), los factores determinantes de la adaptabilidad de un híbrido para producción de silaje incluye rendimiento de MS total, relación grano/tallo, y rendimiento de MS digestible por hectárea. Existe una alta correlación entre porcentaje de tallo o de panoja y calidad del silaje de híbridos de sorgo (Schmid et al., 1976), debido a que el contenido de grano de los silajes es la principal fuente de energía. En consecuencia, la relación grano/fracción vegetativa determina el contenido de energía de los silajes (Gourley y Lusk, 1978). Esto indica que las variedades que

presentan alta producción de granos tienen mayor degradabilidad que los híbridos forrajeros, siendo la panoja la fracción de la planta de mayor digestibilidad *in vitro* (Cummins et al., 1971; White et al., 1991) y ésta puede aumentar con el avance de la madurez (Schmid et al., 1976).

Pesce et al. (2000), trabajando con híbridos de distinto porte, encontraron que el híbrido con menor altura tuvo mayor proporción de panoja y, por ende, un valor más elevado de digestibilidad *in vitro*, mientras que el híbrido más alto fue menos digestible (63% vs. 54%). A su vez, Schmid et al. (1976) encontraron que los híbridos graníferos presentaron mayor digestibilidad aparente *in vivo* y ganancia de peso.

Por otro lado, es importante destacar que la fracción vegetativa es una importante proporción de la MS total de la planta y puede afectar negativamente el valor nutritivo del silaje (Tolera et al., 1998; Rocha et al., 2000; Martins et al., 2003; Miron et al., 2005). Esto es debido a que las fracciones de FDN, FDA y lignina están negativamente correlacionadas con la digestibilidad y, en consecuencia, con el consumo (Rocha et al., 2000). En estudios realizados por Harbers y Thouvenelle (1980) utilizando microscopio electrónico para observar la degradabilidad de silaje de sorgo, verificaron que la fracción más digestible constituida por el mesófilo de las hojas, desapareció casi totalmente a las 24 h. A las 48 h solamente restaba el tejido lignificado compuesto por el parénquima de los tallos, el cual permaneció por más de 72 h.

Por lo tanto, como se dijo anteriormente, la tasa de degradación depende de la composición y de la estructura de la pared celular (Cherney et al., 1986; Fritz et al., 1990) y la modificación de ésta permite el mejoramiento de genotipos de sorgo (Tonani et al., 2001). De hecho, en algunos trabajos sobre silajes de sorgo de híbridos *bmr* se ha encontrado mayor digestibilidad de la FDN (Cherney et al., 1986; Fritz et al., 1990)

y, en consecuencia, de la materia seca en comparación con híbridos normales (Grant et al., 1995; Casler et al., 2003), aunque en algunos casos las tasas de degradación de la FDN fueron similares (Lechtenberg et al., 1974; Fritz et al., 1990). Contrariamente, Miron et al. (2005) no encontraron diferencias en la digestibilidad de la MS de distintos híbridos de sorgo.

En silajes de maíz de híbridos *bmr* se ha encontrado que tienen una tasa más rápida de digestión de MS, celulosa y hemicelulosa que los silajes de híbridos normales y, por lo tanto, tendrían una mayor digestibilidad aparente *in vivo* de la MS (Muller et al., 1972; Oba y Allen, 1999; Ballard et al., 2001) que mejoraría la producción de leche en vacas lactantes (Oba y Allen, 1999).

Lo expuesto anteriormente demuestra que no hay consenso sobre la calidad de los distintos híbridos de sorgo para silaje. El incremento de la importancia del silaje en la nutrición animal remarca la necesidad de conocer los factores que influyen en su valor nutritivo y de desarrollar técnicas para su predicción y validarlas con ensayos *in vivo* (García-Rodríguez et al., 2005).

En el Cuadro 2.2. se presentan valores de digestibilidad aparente *in vivo* de silajes de planta entera de maíz y sorgo encontrados en la bibliografía. Se puede observar que en silajes de sorgo existe un amplio rango en los valores de digestibilidad, que va desde un 48,5 hasta 70% siendo este rango más reducido en silajes de maíz que va desde un 55,9 hasta 63%.

Cuadro 2.2. Valores de digestibilidad aparente *in vivo* de silajes de sorgo y maíz de planta entera.

Material	Dig. MS (%)	Animal	Referencia
Maíz <i>bmr</i>	61,4 a	Corderos	Muller et al. (1972)
Maíz	55,9 b		
Maíz	63,8 a	Corderos	Schmid et al. (1976)
Sorgo	55,6 b		
Maíz <i>bmr</i>	70,9	Corderos	Stallings et al. (1981)
Maíz	64,3		
Maíz	61,4 a	Vacas Holando	Lusk et al. (1984)
Sorgo <i>bmr</i>	58,3 ab		
Sorgo	53,3 b		
Maíz	52,7 a	Novillos	Adewakun et al. (1989)
Sorgo azucarado	54,9 a		
Maíz	55,9 a	Corderos	Mizubuti et al. (2002)
Sorgo forrajero	48,5 b		
Sorgo forrajero	61,7 a	Corderos	Martins et al. (2003)
Sorgo silero	51,4 b		
Sorgo forrajero	53,3 b	Corderos	De Souza et al. (2003)
Sorgo forrajero	63,7 a		
Maíz	60,1 a	Vacas Holando	Oliver et al. (2004)
Sorgo <i>bmr</i> -6	62,9 a		
Sorgo <i>bmr</i> -18	69,1 a		
Sorgo normal	52,5 b		

^{ab} Letras distintas en la misma columna difieren significativamente la comparación se realiza dentro de cada uno de los ensayos

2.6. Producción de carne y leche con dietas basadas en silaje de maíz y sorgo

Los silajes forman parte de una gran proporción de la dieta de las vacas lecheras y animales para producción de carne en varias partes del mundo (García-Rodríguez et al., 2005). Se ha publicado abundante información con respecto a los meritos del silaje de maíz y sorgo, no obstante las conclusiones de los distintos autores difieren debido principalmente por el tipo de híbrido evaluado ó las condiciones ambientales prevalecientes durante el período de crecimiento del cultivo (Grant et al., 1995). Según Nichols et al. (1998) el silaje de sorgo puede ser de similar o superior valor nutritivo que el silaje de maíz, cuando son comparados a iguales concentraciones de fibra en la dieta.

De lo anterior surge que el silaje de sorgo puede ser una alternativa para reemplazar al de maíz como suplemento, tanto en dietas para vacas lecheras (Aydin, Grant y O' Rear, 1999) como para novillos de carne (Adewakun et al., 1989). Por ejemplo De Leon et al. (2004) obtuvieron mayores ganancias de peso con silaje de sorgo *bmr* que con silaje de maíz (0,95 vs. 0,79 kg/d). Estas ganancias son comparables con las presentadas por Adewakun et al. (1989), quienes obtuvieron ganancias de peso similares (0,79 kg/d) entre animales que consumieron dietas basadas en silaje de sorgo azucarado o silaje de maíz.

De igual manera, en varios trabajos se han obtenido producciones de leche similares entre animales alimentados con silaje de sorgo o de maíz, cuando las comparaciones se realizaron utilizando híbridos de sorgo *bmr* (Lusk et al., 1984; Grant et al., 1995), azucarado (Lance et al., 1964; Romero et al., 2003) y granífero (Castro et al., 2001). Contrariamente, se ha encontrado que vacas alimentadas con sorgo

forrajero produjeron aproximadamente 23% menos de leche y 35% menos de grasa en la misma, que las alimentadas con silaje de maíz (Grant et al., 1995).

Estos resultados concuerdan con lo observado por Aydin et al. (1999) quienes obtuvieron producciones de leche similares entre dietas basadas en silajes de sorgo de híbridos *bmr* y de maíz, y producciones de leche 8% inferiores cuando las vacas fueron alimentadas con silaje de sorgo forrajero normal. Los resultados de las comparaciones entre silajes de híbridos normales vs. *bmr* difieren entre distintos autores. Estas diferencias, pueden estar explicadas en parte por variaciones en los efectos de los distintos tipos de gen *bmr* y por las características propias del híbrido al que se le incluyó el gen *bmr* (Oliver et al., 2004).

En la bibliografía se encuentran pocos trabajos que comparen silajes de distintos híbridos de sorgo. En uno de ellos (Neumann et al., 2001) se encontró que los animales alimentados con silaje de un híbrido silero tuvieron mayor ganancia de peso que los alimentados con silaje de un híbrido forrajero. Por otro lado, Castro et al. (2002) observaron altas ganancias de peso (mayores al kilogramo) en animales consumiendo dietas conteniendo distintos niveles (30, 50 y 70%) de silaje de híbrido azucarado. En el Cuadro 2.3. se resume la respuesta productiva de animales alimentados con dietas basadas en silajes de sorgo o maíz.

Cuadro 2.3. Respuesta productiva en animales alimentados con silajes de sorgo o maíz de planta entera.

Silaje	Participación del silaje en la dieta	Ganancia de peso ó producción de leche		Tipo de animal	Referencia
		gramos/día			
Maíz	≅ 100%	709	Novillo	Adewakun et al. (1989)	
Sorgo azucarado		790			
Sorgo silero	63%	1160 a	Novillo	Neumann et al. (2001)	
Sorgo forrajero		940 b			
Maíz	33%	1041 a	Novillo	Castro et al. (2001)	
Sorgo		985 a			
Maíz	50%	1071a			
Sorgo		963 a			
Sorgo forrajero	30%	1315 a	Novillo Holando	Castro et al. (2002)	
	50%	1252 ab			
	70%	1129 b			
Sorgo <i>bmr</i>	Ajustado para lograr 18% de PB en la dieta	660 c	Novillo	De Leon et al. (2004)	
Sorgo <i>bmr</i>		950 a			
Maíz		790 b			
litros/día*					
Maíz	≅ 100%	22,7 a	Vaca Holando	Lusk et al. (1984)	
Sorgo <i>bmr</i>		23,5 a			
Maíz	65%	26,6 a	Vaca Holando	Grant et al. (1995)	
Sorgo <i>bmr</i>		26,2 a			
Sorgo		17,9 b			
Sorgo <i>bmr</i>	35%	31,4 b	Vaca Holando	Aydin et al. (1999)	
Sorgo normal		33,8 a			
Maíz	40%	18,1 a	Vaca Holando	Romero et al. (2003)	
Sorgo <i>bmr</i>		17,4 a			
Sorgo azucarado		17,4 a			
Sorgo	40%	29,1 b	Vaca Holando	Oliver et al. (2004)	
Sorgo <i>bmr-6</i>		33,7 a			
Sorgo <i>bmr-18</i>		31,2 ab			
Maíz		33,3 a			

*Leche corregida al 4%.

^{ab}Letras distintas indican diferencias significativas dentro de cada ensayo.

En síntesis, de la revisión bibliográfica de los trabajos que informan de resultados productivos, se pueden destacar los siguientes aspectos:

1. Con dietas basadas en silaje de maíz o sorgo se pueden obtener altas ganancias de peso y producciones de leche.
2. Existen resultados variables en cuanto a la ganancia de peso y la producción de leche que se puede lograr consumiendo silaje de maíz o de sorgos de distintas características.
3. Varios autores coinciden en que no hay diferencias en respuestas productivas entre animales alimentados con dietas basadas en silajes de sorgo y de maíz.
4. Los híbridos de sorgos *bmr* no siempre presentan mejores respuestas productivas que los híbridos normales.

Por lo tanto, no hay consenso en la bibliografía sobre las ventajas en respuestas productivas del uso de híbridos de sorgo *bmr* con respecto a los híbridos normales para la confección de silajes de planta entera. Esto podría estar relacionado con las variaciones en el contenido de lignina de las distintas líneas de *bmr*, o con las condiciones ambientales prevalecientes durante el crecimiento del cultivo. Algunos autores remarcan la importancia del contenido de grano en el silaje sobre el valor energético de esta reserva, sin embargo otros autores sostienen que la calidad de la fracción vegetativa puede ser de igual importancia que el contenido de grano.

En nuestro país las condiciones ambientales prevalecientes durante la época de crecimiento del cultivo, y principalmente durante la época crítica de definición del rendimiento, pueden ser limitantes para la producción de grano en muchas zonas ganaderas. Además, el desplazamiento de la ganadería por la agricultura hacia zonas

de menor aptitud edáfica agravaría este problema, por lo tanto es de importancia conocer y evaluar la fracción vegetativa de los híbridos puesto que en esas condiciones va a conformar una gran proporción de material ensilado, ya que la proporción de grano en los silajes puede verse afectada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio experimental

La siembra de los híbridos y la evaluación de digestibilidad *in vivo* se llevaron a cabo en el campo experimental Coronel Suárez, perteneciente al Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, ubicado en la localidad de Pasman (37°11' S y 62° 11' W).

Las determinaciones químicas, la medición de la producción de gas *in vitro* y el ensayo de degradabilidad *in situ* se realizaron en el INTA, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce y en la Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP, provincia de Buenos Aires (37°45' S, 58°18' W, 130 m sobre el nivel del mar).

3.2. Cultivos

3.2.1. Descripción de los materiales evaluados

Se utilizaron tres híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) de diferentes características agronómicas:

- ✓ Dairy Master del semillero Druetto recomendado para silaje, que tiene incorporado el gen de nervadura marrón (*bmr*) y se publicita por tener 40-60% menos lignina que los híbridos no mutantes. Posee

grano blanco sin taninos condensados y es de ciclo intermedio (85 días a floración).

- ✓ AG 200 del semillero Agriseed. Es un híbrido silero, se caracteriza por tener alta producción de MS, buen rendimiento de grano y elevada concentración de carbohidratos solubles en el tallo. Es de ciclo intermedio (90 días a floración).

- ✓ AG 1809 del semillero Agriseed. Es un híbrido granífero con alta producción y calidad de grano. Es de ciclo corto-intermedio (79 días a floración).

3.2.2. Siembra de los híbridos

Los tres híbridos fueron sembraron en condiciones de campo en una superficie de 0,5 hectárea para cada híbrido. La siembra se realizó el 27 de diciembre de 2004, a una densidad de 12 plantas/m lineal, con una distancia entre surcos de 70 cm. Se fertilizaron con 60 kg de fosfato diamónico a la siembra y se controlaron químicamente las malezas y plagas durante todo el ciclo.

3.2.3. Cosecha y confección de silajes

Los híbridos se cosecharon a comienzo de panojamiento, estado 5-6 según escala fenológica de Vanderlip y Reeves (1972), para obtener un material con máxima proporción de fracción vegetativa. La cosecha se realizó con una máquina corta-

picadora de arrastre. El material cosechado se compactó con un tractor para lograr las condiciones de anaerobiosis necesarias para favorecer la fermentación láctica. Se realizaron tres silos puente de 4 x 7 m.

3.3. Determinaciones químicas

De cada uno de los silajes se tomaron cinco muestras al azar de distintos lugares del silo, de aproximadamente 2 kg, que se mantuvieron individualizadas y se secaron en estufa con circulación de aire forzado a 60°C, hasta peso constante. Una fracción de cada muestra se molió a 1 mm con un molino tipo Willey y el resto se reservó para realizar las mediciones de degradabilidad in situ. En las muestras molidas a 1 mm se realizaron los siguientes análisis:

- Materia seca (MS, secado de las muestras en estufa con circulación forzada de aire, a 60 °C hasta peso constante y determinación de la diferencia de peso entre material original y material seco)
- Materia orgánica (por calcinación en mufla a 500°-600 °C durante 3 horas y determinación de la diferencia entre las cenizas y la muestra antes de calcinarse)
- Fibra en detergente neutro (FDN, Van Soest et al., 1991)
- Fibra en detergente ácido (FDA, Van Soest et al., 1991)
- Lignina (Van Soest et al., 1991)
- Proteína bruta (PB, por determinación de N * 6,25 por conductividad térmica en el equipo Leco FP-528. (Horneck y Miller, 1998).
- Almidón por método enzimático (MacRae y Armstrong, 1968)

3.4. Digestibilidad *in vivo* de la MS y de la FDN

3.4.1. Animales

Se utilizaron 15 corderos de raza Corriedale de $33,4 \pm 2,6$ kg de peso vivo, alojados en jaulas metabólicas dentro de un galpón y asignados aleatoriamente a cada uno de los tres tratamientos, quedando 5 animales por cada híbrido evaluado.

3.4.2. Procedimiento

El ensayo duró 16 días y constó de dos etapas:

Etapas de acostumbramiento: Se realizó durante los primeros 10 días. La dieta suministrada se formuló para alcanzar un 12% de PB y estaba compuesta (en base a MS) por 86% de silaje de sorgo más 14% de un concentrado proteico de 45% PB. Los animales se alimentaron *ad libitum* durante la totalidad del ensayo.

Etapas de medición: Durante los 6 días siguientes se midió el alimento ofrecido, el rechazado y las heces producidas. Los animales fueron alimentados dos veces al día, por la mañana (9 h) y por la tarde (16 h) y las heces se recolectaron por la mañana. Del total de la producción de heces diarias, de cada animal, se extrajo una muestra (20%) para formar un pool del período de colección, en el cual se determinó el contenido de MS y de FDN. El consumo se determinó por diferencia entre la oferta y el rechazo de alimento. El valor de digestibilidad *in vivo*, de la MS y de la FDN, se obtuvo a través de la siguiente ecuación: Digestibilidad aparente *in vivo* = $((\text{consumo} - \text{heces}) / \text{consumo}) \times 100$.

3.5. Estudios de la digestibilidad con métodos indirectos

3.5.1. Degradabilidad *in situ*

3.5.1.1. Animales

Se utilizaron tres novillos A. Angus de 500 \pm 50 kg de peso vivo con fístula ruminal, los cuales se mantuvieron el aire libre en corrales individuales con agua disponible a voluntad. Se alimentaron dos veces al día (9 y 16 h) a nivel de mantenimiento de peso (AFRC, 1993) con una dieta compuesta de heno de alfalfa (36%), heno de gramíneas (36%), grano de maíz (10%) y expeller de girasol (18%). Esta dieta fue similar a la del animal donante utilizado en el laboratorio para las determinaciones de producción de gas *in vitro*. Luego de un período de acostumbramiento de 10 días se realizaron las incubaciones.

3.5.1.2. Procedimiento

Se colocaron 5 \pm 0,05 g MS de cada material molido a 2 mm en bolsas de dacrón de 10 x 20 cm y tamaño de poro medio de 50 μ m, siguiendo la técnica de Mehrez y Ørskov (1977). Las bolsas fueron introducidas en el rumen en distintos horarios y retiradas todas juntas. Los tiempos de incubación fueron 3, 6, 9, 12, 24, 48 y 72 horas. Cada muestra se incubó por duplicado en cada uno de los animales y en cada horario. Se estimó la fracción soluble introduciendo en el rumen bolsas adicionales durante 5 minutos. Al retirar las bolsas del rumen se realizó un prelavado con agua fría y se

congelaron en freezer, posteriormente se lavaron a mano hasta que escurrió agua transparente y se colocaron en estufa a 60°C hasta peso constante. La degradabilidad de la MS se calculó a partir del peso del residuo.

3.5.1.3. Cinética de degradación y degradabilidad efectiva de la MS

La cinética de degradación de la MS se describió con el modelo propuesto por Mc Donald (1981).

$$P = a', \text{ para } t \leq L$$

$$P = a + b(1 - e^{-ct}) \text{ para } t > L$$

Donde:

P: fracción degradada de MS en el tiempo t (%)

a: fracción rápidamente degradable (%)

b: fracción insoluble, lentamente degradable (%)

c: tasa de degradación de la fracción b (%/h)

t: tiempo de incubación en el rumen (horas)

a': degradabilidad observada al tiempo 0 (%)

L: tiempo de retardo (lag time, h),

Se calculó la degradabilidad efectiva (DE) utilizando el modelo de Mc Donald (1981) para tasas de pasaje de 2%/h, 5%/h y 8%/h, que son las correspondientes a

vacas de cría, novillos en engorde y vacas lecheras en producción según el AFRC (1993):

$$DE' = a' + [(b'c)/(c + kp)] e^{-(c + kp) L}$$

Donde:

a', c, L: variables ya descritas

b': $(a+b)-a'$

kp: tasa de pasaje (%/h)

3.5.2. Producción de gas *in vitro*

3.5.2.1. Tratamiento de muestras y medición de la producción de gas

La producción de gas fue medida por el Laboratorio de Nutrición y Evaluación de Alimentos de INTA Balcarce según la técnica de Theodorou et al. (1994), modificada (Villalba, 2001; Garciarena y Villalba, 2002). Se incuban, durante 3, 6, 12, 24, 48 y 72 h, 500 mg de muestra seca y molida (1 mm) en frascos de 125 ml con líquido ruminal en baño termostático a 39 °C. El licor ruminal se obtiene de un vacuno alimentado con una dieta compuesta por heno de alfalfa (36%), heno de gramíneas (36%), grano de maíz (19%) y expeller de girasol (9%). La presión de gas se midió con un manómetro electrónico digital PSI-TRONIX, rango 0-20 PSI, resolución 0,01 PSI, provisto de una aguja de 0,8 x 25 mm.

3.5.2.2. Modelo utilizado para el estudio de la cinética de producción de gas

Los datos de producción de gas se analizaron con el modelo de Mc Donald (1981), cuyas variables ya fueron descritas, y con el modelo de France et al. (1993):

$$Y = A \{1 - e^{[-b(t-L) - c \times (\sqrt{t} - \sqrt{L})]}\}$$

donde:

Y : producción acumulada de gas (ml)

A : asíntota superior (producción potencial de gas, ml)

L : tiempo de retardo (lag time, h)

b : (h^{-1}) y **c**: ($h^{-0.5}$), tasas fraccionales constantes

Se calculó la tasa fraccional combinada de producción de gas (France et al., 2000)

como:

$$\mu = b + c/2\sqrt{t},$$

donde:

μ : tasa de producción de gas (h^{-1})

b y c: parámetros ya descriptos

t: tiempo de incubación (h)

3.5.2.3. Degradabilidad de la MS *in vitro* estimada a partir de la producción de gas

Se calculó la degradabilidad *in vitro* de la MS según el procedimiento del Laboratorio de Nutrición y Evaluación de Alimentos de INTA Balcarce, el cual la estima a partir de la producción acumulada de gas a las 72 h de incubación y ecuaciones de regresión, desarrolladas por Villalba (2001), entre producción de gas y cantidad de sustrato degradado *in vitro*. Esta metodología está ajustada a muestras patrones de digestibilidad *in vitro* estimada por el método de Tilley y Terry (1963).

3.5.3. Ecuaciones predictivas de digestibilidad de la MS a partir de la composición química

Se utilizaron dos ecuaciones ampliamente utilizadas en la bibliografía y en varios laboratorios de nutrición (Weiss, 1993).

- Ecuación sumativa de Van Soest (Van Soest, 1967):

$$\%DMS = 0,98 \times SDN + [1,473 - 0,789 \times \log_{10} (\text{lignina}/\text{FDA})] \times \text{FDN}$$

donde:

SDN: soluble en detergente neutro

lignina/FDA: porcentaje de lignina en la fibra en detergente ácido

- Ecuación predictiva a partir del contenido de FDA (Rohweder et al., 1978):

$$\%DMS = 88,9 - (\%FDA \times 0,779)$$

3.6. Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado, considerando como repetición (n=5) a cada muestra en la evaluación de la composición química, y a cada animal en la medición de digestibilidad *in vivo*. Este modelo también fue utilizado para analizar las variables de los modelos que describen la cinética de la producción de gas, y los valores de digestibilidad estimados con las ecuaciones predictivas.

El modelo matemático utilizado para describir la variable respuesta fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu_i + \zeta_i + e_{ij}$$

donde:

Y_{ij} : variable respuesta

μ_i : media general

ζ_i : efecto del i-ésimo tratamiento (híbrido)

e_{ij} : error experimental aleatorio

Para analizar los resultados del ensayo de degradabilidad *in situ* se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizado, considerando al animal como bloque.

El modelo matemático utilizado para describir la variable respuesta fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu_i + \zeta_i + \beta_k + e_{ijk}$$

donde:

Y_i : variable en estudio

μ_i : media general.

ζ_i : efecto del i-ésimo tratamiento (híbrido)

β_k : efecto bloque (animal)

e_{ij} : error experimental aleatorio

La relación entre producción de gas *in vitro* y la degradabilidad *in situ* de la MS en los distintos horarios de incubación, en cada híbrido, se estudió por regresión lineal simple. Los parámetros de la regresión se analizaron con test de paralelismo y coincidencia (Snedecor y Cochran, 1980).

Las medias de digestibilidad *in vivo* y las medias de digestibilidad estimadas con los métodos indirectos se compararon utilizando el test de Dunnett.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el procedimiento de modelos lineales generales: PROC GLM, PROC MEANS, y PROC REG del paquete estadístico de SAS (1998).

4. RESULTADOS

4.1. Composición química de la MS

Los silajes no se diferenciaron significativamente ($p < 0,05$) en MO, MS, PB y FDN (Cuadro 4.1.), sin embargo en la composición de la pared celular hubo pequeñas diferencias entre tratamientos. El silaje del híbrido *bmr* presentó el mayor valor de FDA (42,5%) mientras que los silajes de los híbridos azucarado y granífero no se diferenciaron en este parámetro (40,1%). El contenido de lignina fue mayor en los silajes de los híbridos granífero y *bmr* (en promedio 6,9%) que en el silaje del azucarado (4,8%). El contenido de almidón fue mayor en el silaje del híbrido granífero, aunque debido al bajo valor que presentaron los tres silajes, estas diferencias no son de importancia en el silaje.

Cuadro 4.1. Composición química (%) de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbrido	MS	MO	PB	FDN	FDA	Lignina	Almidón
Granífero	21,3	90,8	10,1	56,9	40,1 ^b	6,6 ^a	4,7 ^a
Azucarado	20,0	91,1	9,5	58,0	40,1 ^b	4,8 ^b	3,9 ^b
<i>bmr</i>	20,9	91,6	8,0	59,4	42,5 ^a	7,2 ^a	3,3 ^b
EEM	0,81	0,75	0,74	0,65	0,54	0,20	0,19
p	0,570	0,760	0,165	0,057	0,029	<0,0001	0,001

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.2. Digestibilidad *in vivo* de la MS y de la FDN

En el Cuadro 4.2. se muestra el peso de los animales, el consumo de MS y las heces producidas por los corderos alimentados con los silajes en estudio. Como se puede observar, no hubo efecto de híbrido en ninguna de las variables mencionadas ($p > 0,05$). El consumo de MS fue en promedio de $36,2 \text{ g/kg}^{0,75}/\text{d}$, representando este valor aproximadamente el 1,5% del peso vivo de los corderos.

Cuadro 4.2. Peso vivo, consumo de MS y producción de heces de corderos alimentados con silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbrido	Peso cordero	Consumo MS		Heces
	kg	$\text{g/kg}^{0,75}\text{d}$	kg cab/d	kgMS/d
Granífero	$33,4 \pm 2,0$	$37,6 \pm 3,2$	$0,52 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,02$
Azucarado	$33,3 \pm 2,7$	$37,3 \pm 3,7$	$0,52 \pm 0,07$	$0,24 \pm 0,04$
<i>bmr</i>	$33,6 \pm 3,4$	$34,0 \pm 2,0$	$0,47 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,03$
EEM	1,24	1,31	0,02	0,01
p	0,981	0,133	0,250	0,531

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

Los valores de digestibilidad *in vivo* de la FDN y de la MS se muestran en el Cuadro 4.3. donde se puede observar que el silaje del híbrido azucarado tuvo mayor digestibilidad *in vivo* de la FDN ($p < 0,05$) que el silaje del híbrido granífero (53,3 vs. 44,6%), mientras que el silaje del *bmr* presentó un valor intermedio de 46% sin diferenciarse de ninguno de los silajes. Sin embargo, la digestibilidad de la MS, no presentó diferencias significativas entre silajes, siendo la misma en promedio de 51,7%. No obstante, se puede observar que el silaje del híbrido azucarado tuvo un valor numérico de digestibilidad más alto (7,8%) que el de los demás silajes.

Cuadro 4.3. Digestibilidad *in vivo* (%) de la FDN y de la MS de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbrido	Digestibilidad <i>in vivo</i>	
	FDN	MS
Granífero	44,6 ± 5,7 ^b	50,6 ± 3,8
Azucarado	53,3 ± 1,5 ^a	54,3 ± 1,6
<i>bmr</i>	46,0 ± 5,7 ^{ab}	50,1 ± 4,8
EEM	2,11	1,70
p	0,028	0,173

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.3. Degradabilidad *in situ*

4.3.1. Cinética de degradación de la MS

En la Figura 4.1. se muestran los patrones de degradación de la MS de los tres silajes. Como se puede observar hubo un tiempo de retardo (lag time) antes de comenzar su degradación y, por esta razón, los datos se ajustaron al modelo de McDonald (1981) que contempla este parámetro. El patrón de degradabilidad de los híbridos fue similar, alcanzando el azucarado una magnitud mayor.

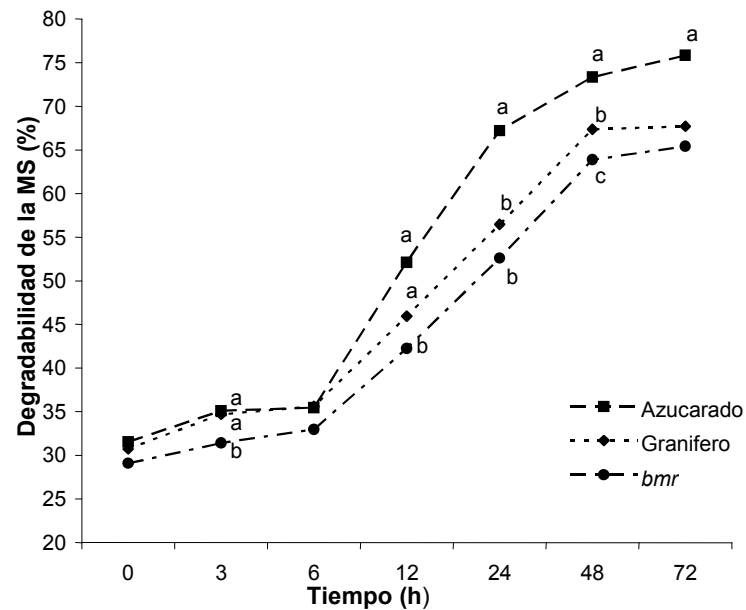


Figura 4.1. Patrón de degradabilidad *in situ* de la MS de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgos. ^{ab}Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre silajes dentro del mismo tiempo de incubación,

En el Cuadro 4.4. se muestran los parámetros del modelo mencionado para los tres silajes evaluados. El silaje del híbrido azucarado mostró los mayores valores ($p < 0,05$) de fracción degradable (b), potencialmente degradable (a+b) y tasa fraccional de degradación (c). En estos parámetros los silajes de los híbridos granífero y *bmr* no se diferenciaron entre sí. La fracción soluble (a) fue levemente inferior en el silaje del *bmr* (29,9%) en comparación con los otros dos silajes que no se diferenciaron entre sí (promedio: 32,7%), en tanto que el tiempo de retardo (L) no se diferenció entre los silajes.

Cuadro 4.4. Parámetros de la cinética de degradación *in situ* de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbrido	a (%)	b (%)	c (%/h)	a + b (%)	L (h)
Granífero	32,4 ^a	37,7 ^b	6,2 ^b	70,1 ^b	5,5
Azucarado	32,8 ^a	42,7 ^a	8,8 ^a	75,4 ^a	4,9
<i>bmr</i>	29,9 ^b	37,9 ^b	6,3 ^b	67,8 ^b	5,6
EEM	0,47	0,80	0,43	0,75	0,17
p	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,105

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$.

a: Fracción soluble; b: Fracción degradable; c: tasa Fraccional de degradación; a+b: Fracción potencialmente degradable; L: tiempo de retardo o lag time.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.3.2. Degradabilidad efectiva de la MS

En el Cuadro 4.5. se muestra la degradabilidad efectiva (DE) calculada para tasas de pasaje de 2, 5 y 8 %/h. Se puede observar que hubo diferencias entre silajes en las tres DE calculadas. En todos los casos la DE fue mayor ($p < 0,05$) en el silaje del híbrido azucarado, intermedia en el granífero y menor en el *bmr*.

Cuadro 4.5. Degradabilidad efectiva (%) de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo calculada a distintas tasas de pasaje.

Híbrido	Tasa de pasaje		
	2%/h	5%/h	8%/h
Granífero	59,9 ± 2,3 ^b	51,9 ± 2,9 ^b	47,4 ± 3,1 ^b
Azucarado	66,9 ± 1,7 ^a	59,0 ± 1,4 ^a	54,1 ± 1,6 ^a
<i>bmr</i>	57,9 ± 1,7 ^c	50,1 ± 1,4 ^c	45,6 ± 1,4 ^c
EEM	0,41	0,48	0,51
p	0,0001	<0,0001	<0,001

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, p<0,05.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.4. Producción de gas *in vitro*

4.4.1. Perfil de producción de gas a través del tiempo

En el Cuadro 4.6. se presentan la producción de gas de los silajes de sorgo expresada como ml/gMS incubada. Se puede observar que en los primeros horarios de incubación (3 y 6 h) los híbridos granífero y azucarado no se diferenciaron en la producción de gas, superando al híbrido *bmr* en aproximadamente 3,3 y 6,4 ml/gMS respectivamente. A partir de las 12 h, y en todos los restantes horarios de incubación, la producción de gas fue mayor en el híbrido azucarado, mientras que este parámetro fue similar en los otros dos silajes.

Cuadro 4.6. Producción de gas (ml/gMS incubada) en distintos horarios de incubación de tres silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbridos	Hora de incubación					
	3	6	12	24	48	72
Granífero	14,5 ^a	29,1 ^a	54,1 ^b	89,9 ^b	134,9 ^b	163,4 ^b
Azucarado	14,9 ^a	32,7 ^a	66,4 ^a	114,3 ^a	164,4 ^a	191,9 ^a
<i>bmr</i>	11,4 ^b	24,5 ^b	45,8 ^b	78,9 ^b	125,3 ^b	151,7 ^b
EEM	0,56	1,71	2,71	3,27	3,57	4,10
p	0,002	0,007	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

En la Figura 4.2. se muestran las tasas de producción de gas a distintos horarios de incubación. Los patrones de fermentación fueron similares entre los silajes, donde la tasa de producción de gas aumentó hasta la hora 6 y descendió posteriormente. Durante las primeras 24 h de incubación el silaje del híbrido azucarado presentó mayor tasa de producción de gas que los restantes silajes, con un valor máximo de 6 ml/gMS incubada/h que se registró a las 6 horas de incubación. A las 72 h los tres silajes presentaron tasas similares.

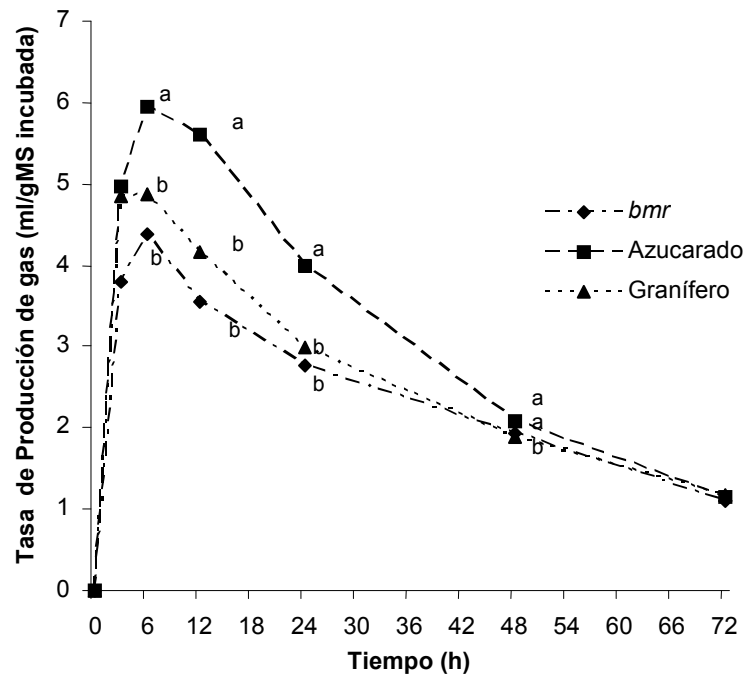


Figura 4.2. Tasa de producción de gas *in vitro* (ml/gMS incubada/h) de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgos. ^{ab}Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre silajes dentro del mismo tiempo de incubación.

4.4.2. Cinética de la producción de gas

En el Cuadro 4.7. se muestran los valores de los parámetros de los modelos de France et al. (1993) y McDonald (1981). Los parámetros del modelo de France et al. (1993) no fueron diferentes entre híbridos. Los valores promedio fueron producción potencial de gas (A) 208,1 ml; tasa fraccional combinada de producción de gas (μ) 0,02 ml/h y el tiempo de retardo (L) igual a 0,21 h. En cambio, se observaron diferencias entre híbridos cuando fueron comparados con el modelo de Mc Donald (1981). La producción de gas generada por la fracción soluble (a) fue mayor ($p < 0,05$) en el silaje del híbrido *bmr* con respecto al promedio de los otros dos silajes (1,25 vs. 0,01ml/gMS). La tasa fraccional de producción de gas (c) fue similar entre silajes,

siendo en promedio de 0,03 ml/h. El tiempo de retardo (L) fue mayor en el silaje del híbrido azucarado que en los otros silajes (0,77 vs. 0,03 h).

Cuadro 4.7. Parámetros de producción de gas *in vitro* (ml/g MS incubada) estimados por los modelos de France et al. (1993) y McDonald (1981).

Híbridos	France et al. (1993) ¹			McDonald (1981)			
	A	μ (h ⁻¹)	L (h)	a	b	c (h ⁻¹)	L (h)
Granífero	214,5	0,02	0,03	0,02 ^b	188,6 ^b	0,03	0,001 ^b
Azucarado	216,5	0,03	0,03	0,00 ^b	210,7 ^a	0,03	0,77 ^a
<i>bmr</i>	196,4	0,02	0,57	1,25 ^a	191,1 ^b	0,03	0,10 ^b
EEM	6,29	0,001	0,19	0,21	4,11	0,002	0,13
p=	0,083	0,056	0,123	0,002	0,043	0,058	0,003

A: producción potencial de gas (asíntota superior); μ : tasa de producción de gas; L: lag time o tiempo de retardo, a: producción de gas generada por la fracción soluble; b: producción de gas generada por la fracción degradable; c: tasa constante de producción de gas; L: lag time

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.4.3. Degradabilidad *in vitro* de la MS calculada a partir de la producción de gas

El silaje del híbrido azucarado presentó el mayor valor de degradabilidad *in vitro*, siendo el mismo de 66,1% ($p < 0,05$), mientras que los silajes de los híbridos granífero y *bmr* no se diferenciaron entre sí y mostraron un valor promedio de 54,0% (Cuadro 4.8.).

Cuadro 4.8. Degradabilidad *in vitro* (%) de la MS de tres silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo.

Híbrido	Degradabilidad <i>in vitro</i>
Granífero	56,2 ^{ab}
Azucarado	66,1 ^a
<i>bmr</i>	51,7 ^b
EEM	1,10
p=	<0,0001

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, $p < 0,05$.

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.5. Relación entre producción de gas y degradabilidad *in situ*

En la Figura 4.3. se muestra la relación entre producción de gas *in vitro* y degradabilidad *in situ* de los tres silajes. Se puede observar que ambas variables se relacionaron linealmente en todos los silajes, presentando un R^2 alto en las tres ecuaciones (0,93-0,95).

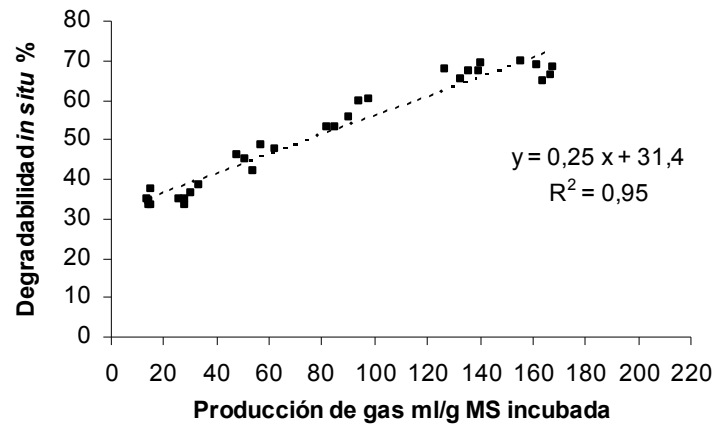
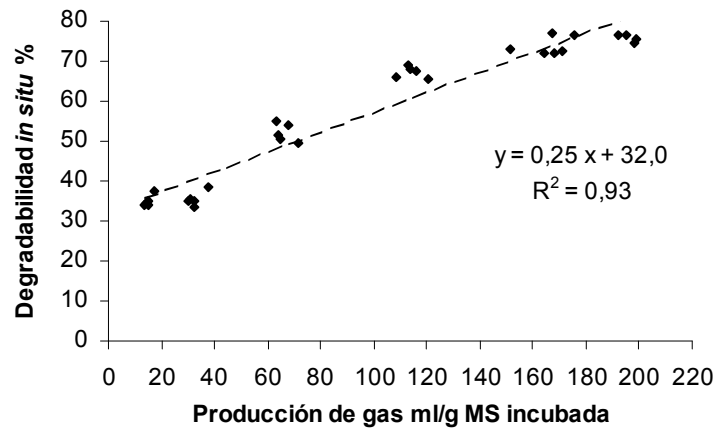
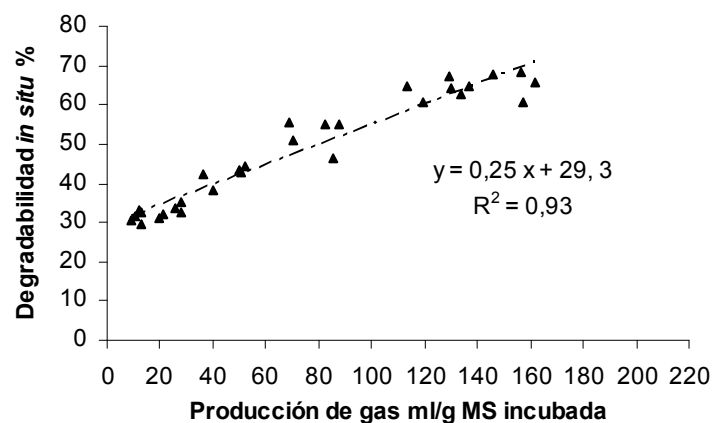
Hibrido granífero**Hibrido azucarado****Hibrido bmr**

Figura 4.3. Relación entre producción de gas *in vitro* y degradabilidad *in situ* de la MS de silajes de fracción vegetativa de sorgo.

El test de paralelismo y coincidencia no mostró diferencias significativas entre los silajes en intercepto y pendiente, por lo tanto se realizó una regresión juntando los datos de los tres silajes (Figura 4.4.). La ecuación general fue: $y = 30,7 + 0,25x$ ($R^2 = 0,93$), donde: y = degradabilidad ruminal de la MS (%); x = ml gas/gMS incubada.

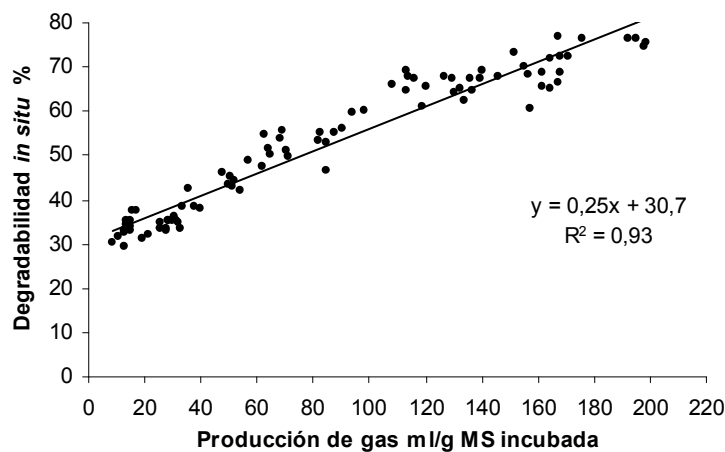


Figura 4.4. Relación entre producción de gas *in vitro* y degradabilidad *in situ* de la MS de silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgos.

4.6. Digestibilidad de la MS estimada a partir de ecuaciones basadas en la composición química del alimento

Las ecuaciones sumativa de Van Soest estimó valores de digestibilidad numéricamente más altos que la basada en la FDA. Ambas ecuaciones estimaron un valor de digestibilidad mayor para el híbrido azucarado y menor para el *bmr*. Con respecto al silaje del híbrido granífero la ecuación de Van Soest calculó que un valor de digestibilidad que fue similar a la del híbrido *bmr*, mientras que la ecuación basada en la FDA calculó para el híbrido granífero una digestibilidad similar a la del híbrido azucarado.

Cuadro 4.9. Digestibilidad de la MS (%) de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo estimada por ecuaciones basadas en la composición química del alimento.

Híbrido	E. Sumativa	E. FDA
Granífero	71,4 ^b	57,7 ^a
Azucarado	77,3 ^a	57,6 ^a
<i>bmr</i>	69,6 ^b	56,1 ^b
EEM	0,42	0,67
p=	<0,0001	0,003

^{ab}Letras distintas en la misma columna difieren significativamente, (p<0.05)

EEM: error estándar de la media.

p: nivel de significancia

4.7. Comparación de la digestibilidad medida *in vivo* con las estimaciones de los métodos indirectos

Debido a que se encontró interacción entre “híbrido x técnica” las estimaciones de digestibilidad se compararon con la medida *in vivo* dentro de cada silaje. La única estimación que no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* (p>0,05) en ningún híbrido fue la degradabilidad efectiva al 8%/h. En tanto que, la ecuación sumativa de Van Soest sobrestimó a la digestibilidad *in vivo* en los tres silajes, en el orden de 37,6; 21,7 y 38,9% en el silaje granífero, azucarado y *bmr*, respectivamente (Cuadro 4.10.).

En el silaje del híbrido *bmr* y granífero la DE calculadas para una tasa del 5 %/h y 8 %/h no se diferenciaron de la digestibilidad *in vivo*. Mientras que en el silaje del azucarado solo la DE calculada para un tasa del 8 %/h y la ecuación basada en la FDA no se diferenciaron de la *in vivo*. La degradabilidad *in vitro* estimada a través de

la producción de gas no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* ($p>0,05$) solo en el silaje del híbrido *bmr*, mientras que la sobrestimó en los otros silajes.

Cuadro 4.10. Comparación de la digestibilidad de la MS (%) de silajes de fracción vegetativa de híbridos de sorgo estimada a través de diferentes metodologías, dentro de cada híbrido.

Híbrido	Técnicas						Comparación de medias	
	DE 5%	DE 8%	<i>in vitro</i> ¹	E. Sumativa	E. FDA	<i>in vivo</i>	<i>in vivo</i> vs:	p
Granífero							DE 5%/h	ns
							DE 8%/h	ns
							<i>in vitro</i> ¹	*
							E. Sumativa	**
							E. FDA	***
Azucarado							DE 5%/h	*
							DE 8%/h	ns
							<i>in vitro</i> ¹	***
							E. Sumativa	***
							E. FDA	ns
<i>bmr</i>							DE 5%/h	ns
							DE 8%/h	ns
							<i>in vitro</i> ¹	ns
							E. Sumativa	***
							E. FDA	**
Efecto:								
Híbrido (H)	***							
Técnica (T)	**							
H x T	***							

¹: estimada a partir de la producción de gas

ns: no significativo; p > 0,05; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

p: nivel de significancia

DE 5%: Degradabilidad efectiva calculada para una tasa de pasaje de 5%/h

DE 8%: Degradabilidad efectiva calculada para una tasa de pasaje de 8%/h

E. Sumativa: Ecuación sumativa: %DMS = 0,98 x SDN + [1,473 - 0,789 x log₁₀ (lignina/FDA)] x FDN; donde: SDN: soluble en detergente neutro; lignina/FDA: porcentaje de lignina en la fibra en detergente ácido

E. FDA: Ecuación basada en la Fibra en detergente ácido: (%DMS = 88,9 - (%FDA x 0,779)

5. DISCUSIÓN

5.1. Aspectos generales del ensayo

En este trabajo se confeccionaron silajes de fracción vegetativa de tres híbridos de sorgo: granífero, azucarado y *bmr*. Esto se hizo a los efectos de medir posibles diferencias en la digestibilidad de dicha fracción, evitando el efecto positivo o negativo que podría tener el contenido de grano sobre la digestibilidad de la misma (Hart, 1987). Los sorgos se sembraron en una zona (Pasman, partido de Coronel Suárez, provincia de Buenos Aires) donde normalmente la distribución de las precipitaciones es errática, y el perfil de suelo es poco profundo debido a la presencia de tosca cercana a la superficie (40-60 cm). Esto impide el almacenamiento de agua en el perfil suficiente para la implantación y desarrollo de los cultivos, sometiendo a las plantas a un stress hídrico. Además, generalmente, la temperatura media es baja (< 18°C) hasta fines de noviembre (Apéndice Figura 8.1.), que sumado a la distribución errática de las lluvias retrasan la fecha de siembra. De esta manera los híbridos fueron probados en una zona recomendada para este cultivo, ya que es marginal para el cultivo de maíz. Como era de esperar, hubo deficiencias hídricas durante el período de crecimiento del cultivo (Apéndice Figura 8.2.).

Los híbridos se cosecharon a los 106 días de la siembra cuando visualmente comenzaba el panojamiento (estado 5-6 escala de Vanderlip y Reeves, 1972). Esto se hizo para lograr un material con máxima cantidad de fracción vegetativa. Cabe aclarar que normalmente se cosecha cuando en la panoja el grano está en madurez pastosa, estado 7 según la escala fenológica mencionada, lo cual tarda aproximadamente 150 días desde la siembra.

5.2. Composición química de la MS

En concordancia con el estado fenológico de las plantas al momento de la cosecha, los silajes presentaron bajo contenido de MS (20%) y de almidón (<4%, Cuadro 4.1.). Valores similares de MS fueron encontrados por Muller et al. (1972) en silajes de fracción vegetativa de maíz y por Pesce et al. (2000) y de Souza et al. (2003) en silajes de híbridos de sorgo forrajeros con bajo porcentaje de panoja. El contenido de MS en los silajes varía con la madurez del híbrido, el tipo de tallo y el contenido de grano (Pesce et al., 2000), siendo el grano el componente que realiza el mayor aporte a la MS total de la planta. A pesar del bajo contenido de MS en los silajes de este ensayo no se detectó que la fermentación haya sido afectada. Los mismos se caracterizaron por presentar una textura firme y un color y olor normal.

Los silajes evaluados no se diferenciaron en contenido de MO, MS, PB y FDN (Cuadro 4.1.). El contenido de PB (9% en promedio) fue similar a los valores obtenidos por otros investigadores (Lusk et al., 1984; Gaggiotti et al., 1992; Rocha et al., 2000). Cabe mencionar que en silajes de planta entera de sorgo se ha observado menor contenido de proteína (Oliver et al., 2004; Miron et al., 2005), debido a que existe una correlación negativa entre el porcentaje de panoja y de proteína (Rocha et al., 2000).

Los valores de FDN y FDA en los silajes de este ensayo coinciden con numerosos trabajos, donde el contenido de FDN varió desde 50 a 62% y de la FDA entre 35 y 44% (Tonani et al., 2001; de Souza et al., 2003; Mizubuti et al., 2002; Oliver et al., 2004; Miron et al., 2005). El contenido de FDN fue similar entre silajes, si bien existieron diferencias estadísticas en el contenido de FDA (Cuadro 4.1.), pero fueron de pequeña magnitud y, por tanto, serían de escasa importancia práctica aún en el *bmr*, lo cual coincide con lo informado por otros autores que tampoco han encontrado

diferencias entre silajes de híbridos de sorgo normales y *bmr* (Aydin et al., 1999; Miron et al., 2005). Una revisión sobre investigaciones de híbridos *bmr* indica que existe considerable variación en la composición de la fibra en híbridos de sorgos normales y *bmr* (Cherney et al., 1991; citado por Grant et al., 1995).

En este ensayo los valores de lignina estuvieron en el rango del 5 al 7%. El silaje del azucarado tuvo el menor contenido (4,8%), mientras que el silaje del granífero y *bmr* presentaron valores similares (6,6 y 7,2%). Estos valores se encuentran en el rango observado en la literatura. Por ejemplo, Aydin et al. (1999) y Oliver et al. (2004) encontraron valores de lignina de 7,0 a 7,5% en híbridos *bmr* de distintas líneas, en tanto que Lusk et al. (1984) y Miron et al. (2005) mencionan valores menores a 5%.

El hecho de que el contenido de lignina del silaje del híbrido *bmr* fuese similar al silaje granífero y mayor que el del azucarado podría estar relacionado con la existencia de varios genes *bmr* que pueden tener diferentes efectos sobre el contenido de lignina (Porter et al., 1978), como también con las condiciones ambientales adversas en las que creció el cultivo (Sommerfeldt, Schingoethe y Muller, 1979). Con respecto al primer factor, existen genes *bmr* que no generan una disminución del contenido de lignina y por ende, el híbrido mutado y su isolínea normal presentan similar contenido de lignina (Porter et al., 1978). Además, los genes *bmr* ejercen su efecto sobre enzimas involucradas en la biosíntesis de la lignina. Estas enzimas están codificadas por familias de multi-genes y pueden catalizar reacciones con especificidades variadas. Esta característica genera una gran plasticidad en la estructura de la lignina durante el crecimiento, que puede ser modificada ante condiciones de estrés. En consecuencia, no es posible predecir los efectos de inhibir una reacción enzimática sobre el desarrollo de la lignina (Krause et al., 2003) y, por lo tanto, tampoco se puede predecir las consecuencias de las mutaciones *bmr* sobre el contenido y composición de la lignina.

Con respecto al efecto del estrés Hanna et al. (1981), trabajando con distintas líneas de híbridos de sorgo *bmr* y normales, encontraron que cuando las plantas de sorgo estuvieron sujetas a condiciones de escasas lluvias, algunas de las líneas *bmr* no se diferenciaron de los híbridos normales en digestibilidad de la MS. Estos autores sugirieron que el ambiente puede influir en la expresión de algunos de los genes *bmr*.

Otros autores tampoco encontraron diferencias entre el contenido de lignina de híbridos *bmr* y normales (Colenbrander y Lechtenberg, 1973; Sommerfeldt et al., 1979; Wedig et al., 1987). Es importante remarcar que en este ensayo se compararon tres híbridos que no eran isolíneas, consecuentemente el efecto de la mutación *bmr* puede ser confundido con el efecto del híbrido (Oliver et al., 2004). Queda por dilucidar si el mayor contenido de lignina que presentó el híbrido *bmr* evaluado en este ensayo, estuvo asociado con la composición normal del híbrido, con el tipo de gen *bmr*, o si fue un efecto ambiental.

5.3. Digestibilidad *in vivo* de la MS y de la FDN

En este ensayo la digestibilidad *in vivo* se midió con ovinos debido a que estos animales son más fáciles de manejar y su uso implica menor movimiento de alimento y de excreta. De hecho, en la mayoría de los estudios de digestibilidad de rumiantes se han utilizado ovinos, y la mayor parte de la información de las tablas de valor nutritivo de los alimentos (por ejemplo INRA, 1989; NRC, 1989; MAFF, 1992) también está obtenida en ensayos realizados con ovinos (O' Mara et al., 1999). A su vez, en un estudio comparativo entre vacunos y ovinos se encontró que estas especies digieren de manera similar los silajes (Aerts et al., 1984). Esto fue confirmado por Yan et al. (2002) quienes concluyeron que los valores de digestibilidad derivados de corderos

pueden ser aplicados a vacunos. No obstante Minson (1990) señala que los vacunos digieren los alimentos en mayor proporción que los ovinos, aunque la diferencia es de solamente 2,4%. En síntesis, los valores de digestibilidad obtenidos con ovinos alimentadas a nivel de mantenimiento son aceptados y utilizados como un estándar mundial por la mayoría de los sistemas de alimentación de rumiantes (Dijkstra et al., 2005).

Los animales tuvieron igual consumo de MS en los tres híbridos, en promedio 36,1 g/kg^{0,75}/d (Cuadro 4.2.), siendo estos valores inferiores a los reportados por Mizubuti et al. (2002) y Martins et al. (2003). Probablemente ellos se deba a que los silajes de este ensayo tuvieron bajo contenido de MS, lo cual afecta negativamente al consumo (Gourley y Lusk 1978; Lahr et al., 1983).

Contrariamente a lo esperado, el silaje del híbrido *bmr* fue consumido en la misma cantidad que el granífero y azucarado (Cuadro 4.2.). Resultados similares fueron obtenidos por Miron et al. (2006), quienes compararon silajes de un híbrido *bmr* vs. uno forrajero. Esto se contrapone a lo observado por Stallings et al. (1981) y Ballard et al. (2001) quienes encontraron mayores consumos de MS en animales alimentados con silajes de híbridos *bmr* que con silajes de híbridos normales. Estos autores atribuyeron la diferencia en el consumo al menor contenido de lignina del híbrido *bmr*. En este ensayo el silaje del *bmr* tuvo similar contenido de lignina que el silaje del híbrido granífero, que a su vez fueron superiores al azucarado. Sin embargo, estas diferencias en el contenido de lignina no fueron de gran magnitud y no se manifestaron en diferencias en consumo de MS.

En el análisis de los resultados de digestibilidad (Cuadro 4.3.) merece destacarse los siguientes puntos: 1) bajo las condiciones de este ensayo los animales digirieron en la misma magnitud el silaje de fracción vegetativa del híbrido *bmr*, azucarado y

granífero; 2) la digestibilidad fue baja (51,7%), a pesar de que los híbridos se cosecharon anticipadamente, es decir en el momento de máxima digestibilidad de la fracción vegetativa.

Oba y Allen (2000) tampoco encontraron diferencias significativas en digestibilidad *in vivo* de la MS entre silajes de planta entera de maíz *bmr* y normal. Valores similares de digestibilidad *in vivo* de la MS que los encontrados en este trabajo son mencionados por diversos autores en silajes de sorgo (de Souza et al., 2003; Mauricio et al., 2003) y de maíz (Di Marco et al., 2002; de Lizaso, 2004). Si bien, como se mencionó anteriormente, no hubo diferencias entre híbridos en la digestibilidad de la MS, la FDN del silaje del azucarado fue más digestible (53,3%) que la del granífero (44,6%), mientras que la del silaje *bmr* presentó un valor intermedio (46,0%) que no se diferenció de ninguno (Cuadro 4.3.). Estos valores de digestibilidad *in vivo* de la FDN son comparables con los observados en la bibliografía que varían desde 33 hasta 57% (Adewakun et al., 1989; Martins et al., 2003; de Souza et al., 2003; Oliver et al., 2004). Las diferencias entre los silajes en este parámetro pueden ser atribuidas a la composición de la FDN (Martins et al., 2003), es decir a la proporción en la misma de lignina, celulosa y hemicelulosa. Hunt et al. (1993) y Rocha et al. (2000) mencionan que tanto el contenido como la composición de la lignina afectan negativamente la digestibilidad.

En este trabajo, si bien el silaje del híbrido *bmr* presentó mayor contenido de lignina que el del híbrido azucarado ambos silajes tuvieron similar digestibilidad de la FDN. Esto concuerda con Sommerfeldt et al. (1979) quienes trabajaron sobre silajes de híbridos de maíz, y encontraron que el contenido de lignina del híbrido *bmr* y del híbrido normal fue similar, aun así el híbrido *bmr* presentó mayor digestibilidad de la FDN. Estos datos estarían indicando que los cambios en la composición de la lignina

(Krause et al., 2003; Jung y Allen, 1995) más que su contenido absoluto afectarían la digestibilidad de la pared celular.

En los mutantes *bmr* la principal alteración química en los componentes de la lignina es la disminución en su contenido de ácido p-cumarico (APC) sin variar el contenido del ácido ferulico (AF) (Cherney et al., 1986). En consecuencia, estos híbridos tienen menor relación APC:AF. Se ha observado que la mayor relación APC:AF y concentración de p-cumarico en tallos podría explicar su menor digestión en comparación con las hojas (Fritz et al., 1990). Sin embargo, según Casler et al. (1987) las plantas con menor capacidad de producir lignina pueden presentar respuestas compensatorias ante la necesidad de rigidez de la pared celular. Dichas respuestas consisten en cambios químicos y físicos en los polisacáridos de la pared celular como puede ser el aumento en la cristalinidad de la celulosa. En consecuencia, estos cambios pueden hacer que el aumento de la digestión de esta fracción sea menor que lo esperado (Fritz et al., 1990).

En resumen, la falta de diferencia en digestibilidad de la MS entre los silajes estaría asociada a que los mismos tuvieron pequeñas diferencias en composición química (Cuadro 4.1.). Con respecto al híbrido *bmr* utilizado en este ensayo podría ser que no presente ventajas con respecto a los híbridos normales, o que sus características no se hayan expresado bajo las condiciones de stress hídrico de este ensayo.

5.4. Degradabilidad *in situ*

5.4.1. Cinética de degradación de la MS

El silaje del híbrido azucarado mostró un mejor perfil de degradación *in situ* como muestra la Figura 4.1. y el Cuadro 4.4., en tanto que el híbrido *bmr* no mostró diferencias de importancia con respecto al granífero y estuvo por debajo del azucarado.

Los valores de fracción soluble encontrados en este ensayo (31,7%) son mayores a los presentados por Valentin et al. (1999) en silajes de maíz y por Tonani et al. (2001) en silajes de sorgo, pero son menores a los encontrados por De Boever et al. (2002) en silajes de maíz. Esta fracción esta compuesta por los azúcares y compuestos nitrogenados solubles almacenados en el tallo que no fueron utilizados durante la fermentación láctica del silo. Está constituida principalmente por sacarosa, fructuosa, glucosa y pequeñas cantidades de manosa y galactosa (Molina et al., 2002) que están disponibles inmediatamente para las bacterias del rumen. Un importante factor a considerar es que generalmente la fracción soluble es sobrestimada, debido a que su determinación puede estar influenciada por las pérdidas de pequeñas partículas que pasan a través de los poros de las bolsitas principalmente, durante los primeros horarios de incubación, (Adesogan et al., 1998; Valentin et al., 1999; Dhanoa et al., 1999)

El silaje del híbrido azucarado tuvo mayor fracción degradable (42,7%) que los silajes de los híbridos granífero y *bmr* (37,8% en promedio). Esta fracción esta conformada básicamente por carbohidratos estructurales, principalmente celulosa y hemicelulosa (Tonani et al., 2001). Otros autores han encontrado valores similares de

fracción degradable, tanto en silajes de sorgo como de maíz (Campos et al., 2003; Arias et al., 2003; Di Marco et al., 2005). Estos resultados, en general, muestran que la fracción vegetativa, independientemente del híbrido de maíz o sorgo, tiene baja fracción degradable (inferior al 45-50%).

Las tasas de degradación obtenidas en este ensayo (Cuadro 4.4.) están en el rango de las encontradas por Grant et al. (1995). La mayor tasa fraccional de degradación del silaje azucarado con respecto a la de los silajes granífero y *bmr* pueden ser debida a que este híbrido presentó menor contenido de lignina. De hecho, Tonani et al. (2001) mencionan que la tasa de degradación depende de la composición y estructura de la pared celular, siendo la lignificación el principal factor limitante de la degradabilidad ruminal de los forrajes (Grant et al., 1995; Jung y Allen, 1995). Contrariamente Lechtenberg et al. (1974), evaluando silajes de fracción vegetativa de maíz, concluyeron que la lignina no tendría un efecto significativo sobre la tasa de degradabilidad. Sin embargo cabe destacar que estos autores, a diferencia de los anteriores, determinaron la tasa de degradación *in vitro* y no *in situ*.

5.4.2. Degradabilidad efectiva de la MS

La DE de un alimento depende de la tasa de degradación de las partículas y del tiempo de permanencia en el rumen, por lo tanto la misma puede disminuir si hay un incremento en la tasa de pasaje (McDonald, 1981). Es decir que la extensión de la degradación es el resultado de la competencia en el rumen entre la tasa de digestión y de pasaje (Mertens and Ely, 1982). En este trabajo se calculó la DE considerando tres tasas de pasaje de acuerdo con el AFRC (1993). Este asume una tasa de 2%/h para vacas de cría alimentadas con pastura de baja calidad, una tasa de 5%/h para novillos

consumiendo alimentos de alta calidad y una tasa de 8%/h para vacas lecheras de alta producción.

La DE promedio para los tres silajes, estimada a una tasa de pasaje del 5%/h, fue de 53,6% (Cuadro 4.5.), diferenciándose de la digestibilidad *in vivo* (51,7%) en aproximadamente un 4% (Cuadro 4.10.). También es aceptable la estimación de la DE a una tasa del 8%/h que arrojó un valor de 49%, el cual es un 5% más bajo que la digestibilidad *in vivo*.

Si bien la DE promedio mencionada estuvo en el rango de valores de la digestibilidad *in vivo*, hubo diferencias entre híbridos. Por ejemplo en el granífero y *bmr* la DE (kp= 5%/h) no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* ($p>0,05$) mientras que en el azucarado fue mayor. A su vez, la DE (kp=8%/h) no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* en ningún silaje. En resumen esta información indica que la DE estimada para tasas de pasajes entre el 5 y 8%/h está en un rango de valores similares a los de digestibilidad *in vivo*, lo cual concuerda con otros autores que utilizan la degradabilidad *in situ* medida a las 24 h como parámetro para estimar la digestibilidad *in vivo* (Hunt, et al., 1993; Sapienza et al., 1998; Di Marco et al., 2005). De hecho los datos de Kuehn et al. (1999) muestran que en animales consumiendo silaje de maíz la tasa de pasaje varía entre 4 y 5 %/h. También Sapienza et al. (1998) concluyeron que las comparaciones de degradabilidad *in situ* de silaje de maíz deberían realizarse en un tiempo de incubación no mayor a 24 h de incubación.

La discusión precedente indica que la degradabilidad estimada en un tiempo de incubación de 12 a 24 h estaría dentro del rango de la digestibilidad *in vivo*. No obstante conviene señalar que si bien la metodología *in situ* sirve para estimar la digestibilidad *in vivo*, en las condiciones del presente experimento esta metodología detectó diferencias entre híbridos que no fueron observadas *in vivo*. Por ejemplo, la

DE fue mayor en el silaje azucarado, intermedia en el granífero y menor en el *bmr* en todas las tasas de pasaje consideradas.

5.5. Producción de gas *in vitro*

5.5.1. Perfil de producción de gas a través del tiempo

Como muestran la Figura 4.2. y el Cuadro 4.6., la producción de gas *in vitro* por unidad de MS incubada fue mayor en el silaje del híbrido azucarado y menor en el *bmr*, el cual mostró pequeñas diferencias con el granífero. Todo esto indica que, según esta técnica, el silaje del híbrido azucarado sería más susceptible de ser degradado que los otros silajes, ya que existe una alta correlación entre el volumen de gas producido y degradabilidad de la MS (Mauricio et al., 2003).

En todos los silajes, las mayores tasas de producción de gas fueron obtenidas en los primeros horarios de incubación, probablemente esto esté asociado a la fermentación de los carbohidratos solubles, lo cual concuerda con el hecho de que en el silaje del híbrido azucarado se observó la mayor tasa. A partir de las 6 h, en todos los híbridos las tasas empezaron a disminuir. Esta relación entre la tasa de producción de gas y el tiempo de incubación también fue encontrada por Mauricio et al. (2003) en silajes de sorgo de híbridos forrajeros y sileros.

Una de las ventajas de la técnica de producción de gas es que provee información adicional sobre la cinética de fermentación ruminal (Mauricio et al., 2003). Esto último, se obtiene a partir de la evaluación de la producción de gas a través del tiempo

(Schofield et al., 1994; France et al., 2005) y del ajuste de los datos a modelos matemáticos.

5.5.2. Cinética de la producción de gas

Para estudiar la cinética de la producción de gas se utilizaron los modelos de France et al. (1993) y de Mc Donald (1981), los cuales son ampliamente utilizados por diferentes autores (Valentin et al., 1999; Mauricio et al., 2003; Cabral Filho et al., 2005; García-Rodríguez et al., 2005).

Los parámetros obtenidos del modelo de France et al. (1993) no se diferenciaron entre los silajes, indicando que la cinética de producción de gas fue similar entre ellos (Cuadro 4.7.), lo cual es consistente con lo medido *in vivo*, que no detectó diferencias entre híbridos. Los valores obtenidos tanto de producción potencial de gas (promedio 208,1 ml) como la tasa de producción de gas (0,03ml/g MS incubada/h) se encuentran en el rango de lo obtenido por Mauricio et al. (2003) en silajes de híbridos de sorgos forrajeros y sileros.

A diferencia del modelo anterior, algunos de los parámetros del modelo de Mc Donald (1981) se diferenciaron entre silajes. Por ejemplo, la producción de gas correspondiente a la fracción degradable (b) fue mayor en el silaje azucarado que en los otros dos (210,7 vs. 189,9 ml/gMS incubada, respectivamente), mientras que la tasa fraccional (c) de producción de gas fue similar entre silajes (0,03 ml/gMS incubada/h en promedio). Esta diferencia a favor del híbrido azucarado coincide con lo obtenido *in situ* (Cuadro 4.4.), pero no se observó en la metodología *in vivo*.

En síntesis, el modelo de France et al. (1993) se ajustó a lo observado en el estudio *in vivo*, en tanto que el de Mc Donald (1981) presentó diferencias con lo *in vivo* y guardó relación con los datos *in situ*. Esto podría estar explicado porque el primer modelo se desarrolló para analizar específicamente la producción de gas mientras que el segundo se hizo para interpretar información obtenida a partir de la técnica *in situ*.

5.5.3. Degradabilidad *in vitro* de la MS estimada a partir de la producción de gas

El uso de la producción de gas para estimar la degradabilidad de los alimentos es una técnica de amplia y creciente difusión en el país y en el mundo. De hecho, el Laboratorio de Nutrición y Evaluación de Alimentos de INTA Balcarce utiliza dicha metodología como método de rutina en reemplazo de la técnica *in vitro* de Tilley y Terry (1963).

La degradabilidad *in vitro* estimada a partir de la producción de gas (Cuadro 4.8.) guardó relación con los resultados de degradabilidad *in situ* (Cuadro 4.4.), y mostró coincidencia parcial con la digestibilidad *in vivo* (Cuadro 4.10.). Esto es, el silaje del híbrido azucarado mostró mayor calidad nutritiva en las evaluaciones *in vitro* e *in situ*, lo que no se observó *in vivo*. Cuando se evaluó el silaje del híbrido *bmr* el valor de degradabilidad estimado *in vitro* no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* (51,7 vs. 50,1%, respectivamente) si bien la estimación *in vitro* sobrestimó la *digestibilidad in vivo* ($p < 0,05$) un 22% en el silaje del azucarado (54,3 vs. 66,1%) y un 11% en el silaje del granífero (56,2 vs. 51,7%) (Cuadro 4.10.).

Cabe mencionar que no existe consenso en la bibliografía con respecto a de que manera el volumen de gas es convertido en valores de degradabilidad o digestibilidad,

términos que los autores utilizan indistintamente, ni tampoco al tiempo de incubación de la muestra para medir la producción de gas. Algunos autores para obtener el valor de digestibilidad utilizan ecuaciones basadas en el valor de producción de gas y datos de composición química (Menke et al., 1979; Garcia-Rodríguez et al., 2005); mientras que otros sugieren que las evaluaciones de la producción de gas deben ser complementadas con el filtrado y medición del residuo de la fermentación (Getachew et al., 1998; 2004; Adesogan, 2002). Esto hace dificultoso comparar los resultados de esta tesis con datos presentes en la bibliografía.

Los resultados de degradabilidad *in vitro* obtenida por la técnica de producción de gas dependen, entre otros factores, del tiempo en que se mide la acumulación de gas. Por ejemplo de los datos de Mauricio et al. (2003), quienes evaluaron silajes de diferentes híbridos de sorgo, se puede inferir que la degradabilidad *in vitro* sobrestimó a la *in vivo* 5-20% cuando se estimó a partir del peso del residuo de la fermentación a las 96 h, y del 2 al 13% cuando se utilizó el valor de las 48 h.

En la bibliografía se presentan distintos períodos de incubación (por ejemplo: 24; 72 y 96 h), diferentes ecuaciones para estimar la calidad nutritiva de los alimentos, y existen diferentes terminologías para definir el resultado de esta evaluación, tales como digestibilidad, degradabilidad y valor nutritivo. A pesar de esta amplia variedad de metodologías para obtener un valor de digestibilidad a partir de la producción de gas, esta técnica es ampliamente utilizada en los trabajos de investigación y en laboratorios comerciales. Por lo tanto es necesario que sea estandarizada y que sus resultados sean testeados con ensayos *in vivo* para lograr un mejor ajuste y obtener así estimaciones exactas de la digestibilidad *in vivo*.

5.6. Relación entre degradabilidad *in situ* y producción de gas *in vitro*

Los datos de producción de gas se relacionaron linealmente con los de degradabilidad *in situ*, en los tres silajes, lo cual muestra que es posible estimar la degradabilidad de la MS del alimento a partir de la producción de gas *in vitro*. La relación entre dichas técnicas (Figura 4.4.) esta dada por la siguiente ecuación: $y = 30,7 + 0,25 x$ ($R^2 = 0,93$), donde: y = degradabilidad ruminal de la MS (%); x = ml gas/g MS, la que indica que por cada 100 ml gas/g MS producido se degradaría un 55,7 % de MS. Pell et al. (1997) también mencionan una relación lineal entre la producción de gas y degradabilidad de la FDN. Cabe señalar que dicha relación puede ser afectada por diferencias en la dieta del animal donante y la preparación de las muestras (De Boever et al., 2005), por lo que no puede ser aplicada indistintamente a diferentes condiciones.

La importancia de la encontrar una relación entre estas metodologías es que si bien en la metodología *in situ* el alimento está expuesto tanto a las condiciones normales del rumen como a los efectos de la dieta y del consumo sobre la degradabilidad, la técnica de producción de gas es un método rápido que permite evaluar simultáneamente gran cantidad de muestras y permite un estudio más detallado de la fracción soluble del alimento, además de ser menos dependiente del animal (Valentin et al., 1999; Adesogan, 2002; De Boever et al., 2005).

5.7. Digestibilidad de la MS estimada a partir de ecuaciones basadas en la composición química del alimento

Existen diferentes tipos de ecuaciones para predecir la digestibilidad de un alimento a partir de su composición química. En este trabajo se usaron dos ecuaciones basadas en parámetros diferentes y de distinta complejidad. Una es la ecuación sumativa de Van Soest que tiene en cuenta el contenido celular, al cual le asigna una digestibilidad del 98%, y la pared celular de digestibilidad variables según el contenido de lignina. La otra ecuación está basada solamente en el contenido de FDA. Las mismas son utilizadas ampliamente en laboratorios de nutrición para evaluaciones de rutina porque proveen estimaciones de digestibilidad rápidas y económicas (Weiss, 1993).

En general ambas ecuaciones sobreestimaron la digestibilidad *in vivo* de los silajes (Cuadro 4.9.). La ecuación sumativa fue la que más se alejó de la digestibilidad *in vivo*, con una diferencia de aproximadamente el 40% para el promedio de los híbridos. En cambio, la ecuación basada en la FDA sobrestimó la digestibilidad *in vivo* en un 13%. De acuerdo a estos valores la segunda ecuación arrojó valores más próximos a los obtenidos *in vivo* que la ecuación sumativa.

Esto posiblemente se deba a que la ecuación sumativa fue originada y ajustada para alimentos forrajeros de alto contenido de FDN y baja tasa de pasaje, que no es el caso de los silajes. Esta ecuación predice estimaciones exactas en forrajes (Van Soest 1994; Conrad et al., 1984) pero no en alimentos concentrados (Conrad et al., 1984; Gasa et al., 1989). Mientras que la ecuación basada en la FDA, se fundamenta en que este parámetro está negativamente correlacionado con la digestibilidad del alimento

(Van Soest, 1994; Harlan, Holter y Hayes, 1991). Sin embargo la fibra no es una fracción uniforme y su digestibilidad varía dentro y entre alimentos (Van Soest, 1994).

Además de las diferencias mencionadas, las ecuaciones detectaron diferencias entre híbridos que, como ya se mencionó, no se observaron en la *in vivo*. Según estas ecuaciones el silaje del híbrido *bmr* fue el de menor digestibilidad.

Es importante considerar que estas ecuaciones estiman valores de digestibilidad aceptables sólo si la calidad del alimento a evaluar se encuentra dentro del rango de calidad utilizado para derivar la ecuación (Weiss, 1993, 1998). Es decir, sería erróneo extrapolar esta relación fuera de los límites de la población que le dio origen (Weiss, 1993). Finalmente las ecuaciones evaluadas no consideran los efectos que puede tener el animal sobre la digestibilidad, tal como el consumo de MS (Weiss, 1998), por lo que el uso de estas ecuaciones es cuestionado por diversos autores (Weiss, 1993; 1998; Moore y Undersander, 2002)

6. CONCLUSIONES

- El contenido de FDN fue similar entre los silajes, sin embargo hubo diferencias en su composición siendo el contenido de FDA mayor en el híbrido *bmr* que en los otros dos, mientras que el contenido de Lignina del azucarado fue menor que en el granífero y el *bmr*.

- La digestibilidad *in vivo* de la MS de los silajes de fracción vegetativa de los híbridos *bmr*, silero azucarado y granífero no presentó diferencias y fue en promedio de 51,7%. Sin embargo, la digestibilidad *in vivo* de la FDN fue mayor en el silaje del híbrido azucarado (53,3%), menor en el híbrido granífero (44,6%) e intermedia en el silaje del *bmr* (46,0%), que no se diferenció de los anteriores.

- La estimación de la digestibilidad a partir de métodos indirectos con respecto a los valores medidos *in vivo* mostró un comportamiento errático dado que su exactitud varió con el tipo de híbrido evaluado. Además, estos métodos detectaron diferencias entre híbridos que no fueron observadas *in vivo*.

- La degradabilidad efectiva calculada para una tasa de pasaje del 8%/h fue la única determinación que no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* en ninguno de los tres híbridos, mientras que para una tasa de pasaje del 5%/h no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* en los híbridos granífero y *bmr*, pero sobreestimó a la misma en el híbrido azucarado. Por su parte, la degradabilidad *in vitro* obtenida a través de la producción de gas no se diferenció de la digestibilidad *in vivo* en el híbrido *bmr*, pero la sobreestimó en los híbridos granífero y azucarado. Finalmente las ecuaciones fueron los métodos menos adecuados para estimar la digestibilidad de los silajes.

7. IMPLICANCIAS PRÁCTICAS

Los resultados de este trabajo muestran que la fracción vegetativa del sorgo es de baja calidad y no variaría con el híbrido, siendo la digestibilidad promedio de la MS de 51,7%. Ello indica que para obtener silajes de “alta calidad” es necesario realizar los mismos con mayor cantidad de grano ya que este componente por ser de alto contenido energético es el que define la calidad del silaje. Por lo tanto, en cultivos de sorgo que tengan afectada la producción de grano por condiciones climáticas y/o edáficas, no serían esperables silajes de alta calidad, dado que contendrán una alta proporción de fracción vegetativa.

Bajo la condiciones de este ensayo el silaje del híbrido *bmr* no presentó mejor calidad nutritiva que los otros silajes evaluados. Al respecto existen controversias en la bibliografía sobre sus ventajas productivas. Es de destacar que en la actualidad estos híbridos están muy difundidos comercialmente y se ofrecen a un alto costo, mayor que el de los híbridos normales y, por lo tanto, se debe tener especial atención al momento de elegir un híbrido para silaje. Además hay que considerar que los híbridos *bmr* pueden presentar otros problemas, no evaluados en este ensayo, como son menor rusticidad y mayor propensión al vuelco.

En cuanto a los métodos indirectos para estimar la digestibilidad *in vivo* los resultados no permiten recomendar una técnica en particular para evaluar silajes, ya que el ajuste de cada uno de los métodos indirectos con la digestibilidad *in vivo* dependió del híbrido evaluado. Además detectaron diferencias entre silajes que no fueron observadas *in vivo*, esto significa que algunos silajes que se diferencian con estas metodologías pueden presentar similares respuestas productivas. Sin embargo,

se puede señalar que los resultados del método *in situ* en un tiempo de incubación entre 12-20 h serían los más próximos a la digestibilidad *in vivo*.

En resumen, si bien los métodos indirectos marcaron diferencias entre los híbridos evaluados, en el ensayo *in vivo* los silajes presentaron similar digestibilidad. Dado que la digestibilidad determina la concentración de energía metabolizable y el consumo de MS no habría que esperar ventajas productivas con algún híbrido en particular. Esto implica que se debe tener precaución cuando se interpretan los valores de digestibilidad obtenidos con estos métodos, ya que además en general sobreestimarían la digestibilidad *in vivo* de los silajes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ADESOGAN, A.T. 2002. What are feeds worth? A critical evaluation of selected nutritive value methods. Proceedings 13th Annual Florida Nutrition Symposium, pp. 33-47.
- ADESOGAN, A.T.; OWEN, E.; GIVENS, D.I. 1998. Prediction of the in vivo digestibility of whole crop wheat from in vitro digestibility, chemical composition, in situ rumen degradability, in vitro gas production and near infrared reflectance spectroscopy. *Anim. Feed Sci. Technol.* 74:259-272.
- AERTS, J.V.; DE BOEVER, B.G.; COTTYN, B.G.; DE BRABANDER, D.L.; BUYSSE, F.X. 1984. Comparative digestibility of feedstuffs by sheep and cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 12:47-56.
- AFRC, 1993. Energy and protein requirements of ruminants. An advisory manual prepared by the Technical Committee on responses to nutrients. CAB International, Wallingford, UK. 159 p.
- AKIN, D.E.; CHESSON, A. 1989. Lignification as the major factor limiting forage feeding value especially in warm conditions. 16th International Grassland Congress, Nice, France, pp. 1753-1760.
- ANDEWAKUN, L.O.; FAMUYIWA, A.O.; FELIX, A.; OMOLE, T.A. 1989. Growth performance, feed intake and nutrient digestibility by beef calves fed sweet sorghum silage, corn silage and fescue hay. *J. Anim. Sci.* 67:1341-1349.
- ANDRAE, J.G.; HUNT, C. W.; PRITCHARD, G.T.; KENNINGTON, L.R.; HARRISON, J.H.; KEZAR, W.; MAHANNA, W. 2001. Effect of hybrid, maturity, and mechanical processing of corn silage on intake and digestibility by beef cattle. *J. Anim. Sci.* 79:2268-2275.
- ARIAS, S.; DI MARCO, O.N.; AELLO, M.S. 2003. Effects of hybrid and maturity on maize stover ruminal degradability in cattle fed different diets. *Asian-Austr. J. Anim. Sci.* 16:1619-1624.
- AYDIN, G.; GRANT, R.J.; O'REAR, J. 1999. Brown midrib sorghum in diets for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82:2127-2135.
- BALLARD, C.S.; THOMAS, E.D.; TSANG, D.S.; MANDEBVU, P.; SNIFFEN, C.J., ENRES, M.I.; CARTER, M.P. 2001. Effect of corn silage hybrid on dry matter yield, nutrient composition, in vitro digestion, intake by dairy heifers, and milk production by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84:442-452.
- BEUVINK, J.M.W.; KOGUT, J. 1993. Modeling Gas production kinetics of grass silajes incubated with buffered ruminal fluid. *J. Animal Sci.* 71:1041-1046.
- BRUNO, O.; ROMERO, L.; GAGGIOTTI, M.; QUAINO, O. 1992. Cultivares de sorgos forrajeros para silaje. 1. Rendimiento de materia seca y valor nutritivo de la planta. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 12:157-162.

- BUXTON, D.R.; REDFEARN, D. 1997. Plant limitations to fiber digestion and utilization. In: New development in forages science contributing to enhanced fiber utilization by ruminants. 37th Annual Ruminant Nutrition Conference, Washington. pp. 814S-816S.
- BUXTON, D.R.; RUSSELL, J.B. 1988. Lignin constituents and cell-wall digestibility of grass and legume stems. *Crop Sci.* 28:1920-1924.
- CABRAL FILHO, S.L.S.; ABDALLA, A.L.; BUENO, I.C.S.; NOZELLA, E.F.; RODRIGUES, J.A.S. 2005. Ruminal fermentation and degradability of sorghum cultivar whole crop, and grains, using an in vitro gas production technique. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:329-339.
- CAMPOS, W.E.; SATURNINO, H.M.; SOUSA, B.M.; GONÇALVES, L.C.; BORGES, I.; RODRIGUES, J.A.S.; CARVALHO, A.U.; FERREIRA, P.M. 2003. Degradabilidade in situ da silagem de quatro genótipos de sorgo com e sem tanino. I. Matéria seca e proteína bruta. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 55:209-215.
- CASLER, M.D.; PEDERSEN, J.F.; UNDERSANDER, D.J. 2003. Forage yield and economic losses associated with the brown-midrib trait in sudangrass. *Crop Sci.* 43:782-789.
- CASLER, M.D.; TALBERT, H.; FORNEY, A.K.; EHLKE, N.J.; REICH, J.M. 1987. Genetic variation for rate of cell wall digestion and related traits in first cut smooth bromegrass. *Crop Sci.* 27:935-939.
- CASTRO, H.; ANDREO, N.; VOTTERO, D.A. 2002. Utilización del silaje de sorgo forrajero azucarado en la terminación a corral de novillos Holando. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 22 (Supl. 1):36-37.
- CASTRO, H.C.; ANDREO, N.A.; VOTTERO, D.A.; BRUNO, O.A. 2001. Evaluación de dietas integradas por silajes de sorgo granífero o maíz para la terminación de novillos Holando Argentino. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 21 (Supl. 1):13-14.
- CENTENO, A.R. 2001. Evaluación de sorgos para silo. *PRODUCIR XXI.* 120:22-26.
- CHERNEY, J.H.; MOORE, K.J.; VOLENEC, J.J.; AXTELL, J.D. 1986. Rate and extent of digestion of cell wall components of brown-midrib sorghum species. *Crop Sci.* 26:1055-59.
- COLENBRANDER, V.F.; LECHTENBERG, V.L. 1973. Digestibility and feeding value of brown midrib corn stover silage. *J. Anim. Sci.* 37:294-295.
- CONRAD, H.R.; WEISS, W.P.; ODWONGO, W.O.; SHOKEY, W.L. 1984. Estimating net energy lactation from components of cell solubles and cell walls. *J. Dairy Sci.* 67:427-436.
- CUMMINS, D.G. 1971. Relationships between tannin content and forage digestibility in sorghum. *Agron. J.* 63:500-502.
- CUMMINS, D.G. 1981. Yield and quality changes with maturity of silage-type sorghum fodder. *Agron. J.* 73:988-990.

- DE BOEVER, J.L.; AERTS, J.M.; VANACKER, J.M.; DE BRABANDER, D.L. 2005. Evaluation of the nutritive value of maize silages using a gas production technique. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:255-265.
- DE BOEVER, J.L.; VANACKER, J.M.; DE BRABANDER, D.L. 2002. Rumen degradation characteristics of nutrients in maize silages and evaluation of laboratory measurements and NIRS as predictors. *Anim. Feed Sci. Technol.* 101:73-86.
- DE LEÓN, M.; GIMÉNEZ, R.; BRUNETTI, M.A. 2004. Consumo y ganancia de peso de novillos alimentados con dietas basadas en silajes de sorgos y maíz. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 24 (Supl. 1):16-17.
- DE LIZASO, I. 2004. Digestibilidad *in vivo* de un silaje de maíz a distintos niveles de consumo. Tesis Ing Agr. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Unidad integrada Balcarce Argentina. 27 p.
- DE SOUZA, V.G.; PEREIRA, O.G.; DE MORAES, S.A.; GARCIA, R.; VALADARES FILHO, S.C.; ZAGO, C.P.; FREITAS, E.V.V. 2003. Valor nutritivo de silagens de sorgo. *R. Bras. Zootec.* 32:753-759.
- DHANOVA, M.S.; FRANCE, J.; LÓPEZ, S.; DIJKSTRA, J.; LISTER, S.J.; DAVIES, D.R.; BANNINK, A. 1999. Correcting the calculation of extent of degradation to account for particulate matter loss at zero time when applying the polyester bag method. *J. Anim. Sci.* 77:3385-3391.
- DHANOVA, M.S.; LOPEZ, S.; DIJKSTRA, J.; DAVIES, D.R.; SANDERSON, R.; WILLIAMS, B.A.; SILESHI, Z.; FRANCE, J. 2000. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: comparison of models. *Br. J. Nutr.* 83:131-142.
- DI MARCO, O.N.; AELLO, M.S.; ARIAS, S. 2005. Digestibility and ruminal digestion kinetics of corn silage. *R. Bras. Zootec.* 57:223-228.
- DI MARCO, O.N.; AELLO, M.S.; NOMDEDEU, M.; VAN HOUTTE, S. 2002. Effect of maize crop maturity on silage chemical composition and digestibility (in vivo, in situ and in vitro). *Anim. Feed Sci. Technol.* 99:37-43.
- DÍAZ, M.; DI NUCCI DE BEDENDO, E.; y PASINATO, A. 2003. Producción y calidad del silaje de sorgo granífero: cultivar, momento de cosecha y procesado del grano. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 23 (Supl. 1):184-185.
- DIJKSTRA, J.; KEBREAB, E.; BANNINK, A., FRANCE, J. y LÓPEZ, S. 2005. Application of the gas production technique to feed evaluation systems for ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:561-578.
- FRANCE, J.; DHANOVA, M.S.; THEODOROU, M.K.; LISTER, S.J.; DAVIES, D. R. and; ISAC, D. 1993. A model to interpret gas accumulation profiles associated with *in vitro* degradation of ruminant feeds. *J. Theor. Biol.* 163:99-111.
- FRANCE, J.; DIJKSTRA, J.; DHANOVA, M.S.; LOPEZ, S.; BANNINK, A. 2000. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: derivation of models and other mathematical considerations. *Br. J. Nutr.* 83:131-142.

- FRANCE, J.; LOPEZ, S.; KEBREAD, E.; BANNINK, A.; DHANOA M.S. and; DIJKSTRA J. 2005. A general compartmental model for interpreting gas production profiles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:473-485.
- FREDDI, J.; ARIAS, S.; PIAZZA, A.M.; SÁNCHEZ, O. y SILVESTRO, R. 2005. Calidad nutritiva de los componentes morfológicos de tres híbridos de sorgo. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 25 (Supl. 1):51-53.
- FRITZ, J.O.; MOORE, K.J.; JASTER, E.H. 1990. Digestion kinetics and cell wall composition of brown midrib sorghum x sudangrass morphological components. *Crop Sci.* 30:213-219.
- GAGGIOTTI, M.C.; ROMERO, L.A.; BRUNO, O.A.; QUAINO, O.R. 1992. Cultivares de sorgos forrajeros para silaje. II. Características fermentativas y nutritivas de los silajes. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 21:171-179.
- GARCIARENA, A.D. y VILLALBA, S.E. 2002. Producción de gas in vitro. Estimación de la degradabilidad de los alimentos para rumiantes. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 22 (Supl. 1):32-33.
- GARCIA-RODRIGUEZ, A.; MANDALUNIZ, N.; FLORES, G.; OREGUI, L.M. 2005. A gas production technique as a tool to predict organic matter digestibility of grass and maize silage. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:267-276.
- GASA, J.; CASTRILLO, C.; BAUCCELLS, M.D. ; GUADA, J.A. 1989. By-products from the canning industry as feedstuff for ruminants: digestibility and its prediction from chemical composition and laboratory bioassays. *Anim. Feed Sci. Technol.* 25:67-77.
- GEE, M.S.; NELSON, O.E.; KUC, J. 1968. Abnormal lignins produced by the brown midrib mutants of maize. II. Comparative studies on normal and brown midrib-1 mutants dimethylformamide lignins. *Arch. Biochem. Biophys.* 123: 403- 408.
- GETACHEW, G.; BLÜMMEL, M.; MAKKAR, H.P.S.; BECKER, K. 1998. In vitro gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 72:261-281.
- GETACHEW, G.; CROVETO, G.M.; FONDEVILA, M.; KRISHNAMOORTHY, U.; SINGH, B.; SPANGHERO, M.; STEINGASS, H.; ROBINSON, P.H.; KAILAS, M.M. 2002. Laboratory variation of 24h in vitro gas production and estimated metabolizable energy values of ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 102:169-180.
- GETACHEW, G.; ROBINSON, P.H.; DEPETERS, E.J.; TAYLOR, S.J. 2004. Relationships between chemical composition, dry matter degradation and in vitro gas production of several ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 111:57-71.
- GIORDA, L.M; FERENSIN, O.J. y CORDES, G.G. 2004. El cultivo de sorgo y el INTA Manfredi. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Argentina. Boletín técnico. N°10. 8 p.
- GIORDA, L.M. 1997. Sorgo granífero. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Argentina. Cuaderno de actualización técnica N° 7. 71 p.

- GOURLEY, L.M. ; LUSK, J.W. 1978. Genetic parameters related to sorghum silage quality. *J. Dairy Sci.* 61:1821-1827.
- GRANT, R.J.; HADDAD, S.G.; MOORE, K.J.; PEDERSEN, J.F. 1995. Brown midrib sorghum silage for mid lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 78:1970-1980.
- HANNA, W.W.; MONSON, W.G.; GAINES, T.P. 1981. IVDMD, total sugars, and lignin measurements on normal and brown midrib (*bmr*) sorghums at various stages of development. *Agron. J.* 73:1050-1052.
- HARBERS, L.H.; THOUVENELLE, M.L. 1980. Digestion of corn and sorghum silage observed by scanning electron microscopy. *J. Anim. Sci.* 50:514-526.
- HARLAN, D.W.; HOLTER, J. B.; HAYES, H.H. 1991. Detergent fiber traits to predict productive energy of forages fed free choice to nonlactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 74:1337-1353.
- HART, S.P. 1987. Associative effects of sorghum silage and sorghum grain diets. *J. Anim. Sci.* 64:1779-1989.
- HART, S.P. 1990. Effects of altering the grain content of sorghum silage on its nutritive value. *J. Anim. Sci.* 68:3832-3842.
- HORNECK, D.A.; MILLER, R.O. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. In Kalra, Y.P. ed. *Handbook of reference methods for plant analysis*. Soil and Plant Analysis Council, Inc. C.R.C. Press, Boca Raton, Florida, USA. pp. 75-84.
- HUNGATE, R.E. 1966. *The Rumen and its Microbes*. Academic Press, New York, NY, USA.
- HUNT, C.W.; KEZAR, W.; HINMAN, D.D.; COMBS, J.J.; LOESCHE, J.A.; and MOEN, T. 1993. Effects of hybrid and ensiling with and without a microbial inoculant on the nutritional characteristics of whole-plant corn. *J. Anim. Sci.* 71:38-43.
- INRA, 1989. Jarrige, R. (Ed.), *Ruminant Nutrition. Recommended Allowances and Feed Tables*. John Libbey Eurotext, Montrouge, France.
- JUNG, H.J. 1989. Forage lignins and their effects on fiber digestibility. *Agron. J.* 81:33-38.
- JUNG, H.J.; ALLEN, M.S. 1995. Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants. *J. Anim. Sci.* 73:2774-2790.
- JUNG, H.J.; DEETZ, D.A. 1993. Cell wall lignification and degradability. In: H.G. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield y J. Ralph (Ed). *Forage cell wall structure and digestibility*. ASA-CSSASSA, Madison, WI. pp. 315-346.
- KRAUSE, D.O.; DENMAN, S.E.; MACKIE, R.; MORRISON, McRAE, A.L.; ATTWOOD, G.T.; MCSWEENEY, C.S. 2003. Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiology Reviews.* 27:663-693.

- KUC, J.; NELSON, O.E. 1964. The abnormal lignins produced by the brown midrib mutants of maize. I. The brown midrib-1 mutants. Arch. Biochem. Biophys. 105: 103- 113.
- KUEHN, C.S.; LINN, J.G.; JOHNSON, D.G.; JUNG, H.G.; ENDRES, M.I. 1999. Effect of feeding silages from corn hybrids selected for leafiness or grain to lactating dairy Cattle. J. Dairy Sci. 82:2746-2755.
- LAHR, D.A.; OTTERBY, D.E.; JOHNSON, D.G. LINN; J.G.; LUNDQUIST, R.G. 1983. Effects of moisture content of complete diets on feed intake and milk production by cows. J. Dairy Sci. 66:1981-1900.
- LANCE, R.D.; FOSS; D.C., KRUEGER, G.R.; BAUMGARDT, B.R.; NIEDERMEIER, R.P. 1964. Evaluation of corn and sorghum silages on the basis of milk production and digestibility. J. Dairy Sci. 47:254-257.
- LAVRENCIC, A.; STEFANON, B.; SUSMEL, P. 1997 An evaluation of the Gompertz model in degradability studies of forage chemical components. Animal Science. 64: 423 - 431.
- LECHTENBERG, V.L.; COLENBRANDER, V.F.; BAUMAN, L.F.; RHKERD, C.L. 1974. Effect of lignin on rate of in vitro cell wall and cellulose disappearance in corn. J. Anim. Sci. 39:1165-1169.
- LECHTENBERG, V.L.; MULLER, L.D.; BAUMAN, L.F.; RHYKERD, C.L.; BARNES, R.F. 1972. Laboratory and *in vitro* evaluation of inbred and F2 populations of brown midrib mutants of *Zea mays* L. Agron. J. 64:657-660.
- LÓPEZ, S.; CARRO, M.D.; GONZÁLEZ, J.S.; OVEJERO, F.J. 1998. Comparison of different in vitro and in situ methods to estimate the extent and rate of degradation of hays in the rumen. Anim. Feed Sci. Technol. 73:99-113.
- LUSK, J.W.; KARAU, P.K.; BALOGU, D.O.; GOURLEY, L.M. 1984. Brown Midrib sorghum or corn silage for milk production. Anim. Sci. 53:1738-1744.
- MACRAE, J.E.; ARMSTRONG, D.G. 1968. Enzyme method for determination of α -linked glucose polymers in biological materials. J. Sci. Food Agric. 19:578-581.
- MARTINS, R.G.R; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUES, J.A.S.; RODRIGUEZ, N.M.; BORGES, I. y BORGES, A.L.C.C. 2003. Consumo e digestibilidade aparente da matéria seca, da proteína e da energia de silagens de quatro genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) por ovinos. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec. 55:341-345.
- MAURICIO, R. M.; OWEN, E., MOULD, F.L.; GIVENS, I.; THEODOROU, M.K., FRANCE, J.; DAVIES, D.R.; DHANOA, M.S. 2001. Comparison of bovine rumen liquor and bovine faeces as inoculum for an in vitro gas production technique for evaluating forages. Anim. Feed Sci. Technol. 89:33-48.
- MAURICIO, R.M.; MOULD, F.; OWEN, E. 1998 Comparison of rumen liquor and faeces from cows as sources of microorganisms for the in vitro gas production technique. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec. 50:569-572.

- MAURICIO, R.M.; MOULD, F.L.; DHANOA, M.S.; OWEN, E.; CHANNA, K.S.; THEODOROU, M.K. 1999. A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 79:321-330.
- MAURÍCIO, R.M.; PEREIRA, L.G.R.; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUEZ, N.M.; MARTINS, R.G.R. y RODRIGUES, J.A.S. 2003. Potencial da técnica in vitro semi-automática de produção de gases para avaliação de silagens de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *R. Bras. Zootec.* 32:1013-1020.
- McBEE, R.H. 1953. Manometric method for the evaluation of microbial activity in the rumen with application to utilization of cellulose and hemicelluloses. *Appl. Microbiol.* 1. 106–110.
- McDONALD, I. 1981. A revised model for the estimation of protein degradability in the rumen. *J. Agric. Sci. Camb.* 96:251-252.
- MEHREZ, A.Z.; ØRSKOV, E.C. 1977. A study of the artificial bag technique for determining the digestibility of feed in the rumen. *J. Agric. Sci. Camb.* 88:645-650.
- MENKE, K.; RAAB, L.; SALEWSKI, A.; STEINGASS, H.; FRITZ, D.; SCHNEIDER, W. 1979. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro. *J. Agric. Sci.* 93:217-222.
- MENKE, K.H.; STEINGASS. 1988. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.* 28: 7–55.
- MERTENS, D.R.; LOFTEN, J.R. 1980. The effects of starch on forage fiber digestion kinetics in vitro. *J. Dairy Sci.* 63:1437-1445.
- MERTENS, D.R.; ELY, L.O. 1982. Relationship of rate and extent of digestion to forage utilisation. A dynamic model evaluation. *J. Anim. Sci.* 54:895-905
- MINISTRY of AGRICULTURE FISHERIES and FOOD. 1992. Feed Composition. UK Tables of Feed Composition and Nutritive Value for Ruminants, second ed. Chalcombe Publications, Nr. Canterbury, UK.
- MINSON, D.J. 1990. Forage in ruminant nutrition. Academic Press, New York. 483 p.
- MIRON, J.; ZUCKERMAN, E.; ADIN, G.; NIKBACHAT, M.; YOSEF, E.; ZENOU, A.; WEINBERG, Z.G.; SOLOMON, R.; BEN-GHEDALIA, D. 2006. Field yield, ensiling properties and digestibility by sheep of silages from two forage sorghum varieties. *Anim. Feed Sci. Technol.* In press.
- MIRON, J.; ZUCKERMAN, E.; SADEH, D.; ADIN, G.; NIKBACHAT, M.; YOSEF, E.; BEN-GHEDALIA, D.; CARMI, A.; KIPNIS, T.; SOLOMON, R. 2005. Yield, composition and in vitro digestibility of new forage sorghum varieties and their ensilage characteristics. *Anim. Feed Sci. Technol.* 120:17-32.
- MIZUBUTI, I.Y.; RIBEIRO, E.L.A.; ROCHA, M.A.; DA SILVA, L.D.F.; PEREIRA PINTO, A.; COSTA FERNANDES, W.; ROLIM, M.A. 2002. Consumo e Digestibilidade Aparente das Silagens de Milho (*Zea mays* L.), Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e Girassol (*Helianthus annuus* L.). *Rev. Bras. Zootec.* 31:267-272.

- MOLINA, L.R.; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUEZ, N.M.; RODRIGUES, J.A.S.; FERREIRA, J.J. y CASTRO NETO, A.G. 2002. Degradabilidade *in situ* da matéria seca e Proteína Bruta das Silagens das silagens de seis Genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em Diferentes Estádios de Maturação. R. Bras. Zootec. 31:148-156.
- MOORE, J.E.; UNDERSANDER, D.J. 2002. Relative Forage Quality: An Alternative to Relative Feed Value and Quality Index. Proceedings 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium. pp. 16-32.
- MULLER, L.D.; LECHTENBERG, V.L.; BAUMAN, L.F.; BARNES, R.F.; RHYKERD, C.L. 1972. *In vivo* evaluation of a brown midrib mutant of *Zea mays* L. J. Anim. Sci. 35:883-889.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1989. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 6^o ed. rev., update. National Research Council. National Academy Press, Washington, DC.
- NEUMANN, M.; RESTLE, J.; FILHO, D.C.A.; BRONDANI, I.L.; DE LIMA CARVALHO BERNARDES, R.A.; DE SOUZA, A.N.M. y KUSS, F. 2001. Avaliação da silagem de diferentes híbridos de sorgo (*sorghum bicolor*, l. Moench) por meio do desempenho de novilhos de corte confinados. Rev. Bras. Zootec. 30:2099-2109.
- NICHOLS, S.W.; FROETSCHER, M.A.; AMOS, H.E.; ELY, L.O. 1998. Effects of fiber from tropical corn and forage sorghum silages on intake, digestion, and performance of lactating dairy cows. J. Dairy Sci. 81:2383-2393.
- NOGUERA, R.R.; SALIBA, E.O. y MAURICIO, R.M. 2004. Comparación de modelos matemáticos para estimar los parámetros de degradación obtenidos a través de la técnica de producción de gas. Livestock Research for Rural Development. Vol: 16 art.: 86.
<<http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd16/11/nogu16086.htm>> [Consulta: 20/06/06].
- NOMDEDEU, M. 2000. Digestibilidad *in vivo* e *in vitro* y composición química del silaje de maíz en tres estados de madurez. Monografía de Especialista en Producción animal. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias. Balcarce, Unidad Integrada, Argentina. 22 p.
- OBA, M; ALLEN, M.S. 1999. Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. J. Dairy Sci. 82:589-596.
- OBA, M.; ALLEN, M.S. 2000. Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on productivity of dairy cows fed two concentrations of dietary neutral detergent fiber: 3. Digestibility and microbial efficiency. J. Dairy Sci. 83:1350-1358.
- OLIVER, A.L.; GRANT, R.J.; PEDERSEN, J.F.; O'REAR, J. 2004. Comparison of Brown Midrib-6 and -18 forage sorghum with conventional sorghum and corn silage in diets of lactating dairy cows. J. Dairy Sci. 87:637-644.

- O'MARA, F.P.; COYLE, J.E.; DRENAN, M.J.; YOUNG, P.; CAFFREY, P.J. 1999. A comparison of digestibility of some concentrate feed ingredients in cattle and sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 81:167-174.
- ØRSKOV, E.R.; McDONALD, I. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci. Camb.* 92:499-503.
- PEDRAZA OLIVERA, R.M. 2001. Estimación del valor nutritivo de los alimentos para ruminantes con énfasis en las técnicas in sacco y de producción de gas in vitro. *Rev. Prod. Anim.* 13:45-51.
- PELL, A.; DOANE, P.; SCHOFIELD, P. 1997. *In vitro* digestibility and gas production. In: Simpósio sobre Tópicos Especiais em Zootecnia, Lavras, MG: 109-132. <<http://www.sbz.org.br/anais1997/Simp/palest7.pdf>> [Consulta: 19/09/06].
- PESCE, D.M.C.; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUES, N.M.; BORGES, I y RODRIGUES, J.A.S. 2000. Porcentagem, perda e digestibilidade in vitro da matéria seca das silagens de 20 genótipos de sorgo. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 52:250-255.
- PORTER, K.S.; AXTELL, J.D.; LECHTENBERG, V.L.; COLENBRANDER, V.F. 1978. Phenotype, fiber composition, and in vitro dry matter disappearance of chemically induced brown midrib (bmr) mutants of sorghum. *J. Dairy Sci.* 18:205-208.
- POSADA, S.L.; NOGUERA, R.R. 2005. Técnica *in vitro* de producción de gases: Una herramienta para la evaluación de alimentos para ruminantes. *Livestock Research for Rural Development*. Vol. 1, Art. 36. <<http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd17/4/posa17036.htm>> [Consulta: 30/7/2006].
- RALPH, J.; HELM, R. 1993. Lignin/hydroxycinnamic acid/polysaccharide complexes: synthetic models for regiochemical characterization. In: Jung, H.G, Buxton, D.R., Hatfield, R.D. y Ralph, J. (Ed). *Forage cell wall structure and digestibility*. ASA-CSSASSA, Madison, WI. pp. 201-246.
- ROCHA, V.R.; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUES, J.A.S.; BRITO, A. F.; BORGES, I. y RODRÍGUEZ, N.M. 2000. Avaliação de sete genótipos de sorgo (*sorghum bicolor* (L.) Moench) para produção de silagem. III- valor nutricional. *Arq. Brs. Med. Vet. Zootec.* 52:627-633.
- ROHWEDER, D. A.; BARNES, R. F.; JORGENSEN, N. 1978. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. *J. Anim. Sci.* 47:747-759.
- ROMERO, L.A.; ARONNA, M.S. y COMERÓN, E.A. 2003. Evaluación de silaje de sorgo forrajero de nervadura marrón para la producción de leche. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 22 (Supl. 1):10-11.
- RYMER, C.; HUNTINGTON, J.A.; WILLIAMS, B.A.; GIVENS, D.I. 2005. In vitro cumulative gas production techniques: History, methodological considerations and challenges. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:9-30.

- SANCHEZ, A.C.; SUBUDHI, P.K.; ROSENOW, D.T.; NGUYEN, H.T. 2002. Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Mol. Biol.* 48:713-726.
- SAPIENZA, D.; LINN, J.; MARTIN, N.; CHASE, L.; SHAVER, R.; HARRISON, J.; WEISS, B.; BERZAGHI, P.; SICILIANO-JOANES, J.; MESSMAN, M.; SATTER, L. 1998. Results of corn silage analysis working group. <<http://www.uwex.edu/ces/forage/cornsilage/csweb2.htm>>. [consulta: 27/09/2006].
- SAS. 1999. SAS/STAT® User's guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- SCHMID, A.R.; GOODRICH, R.M.; JORDAN, G.C.; MARTEN, G.C.; MEISKE, J.C. 1976. Relationship among agronomic characteristics of corn and sorghum cultivars and silage quality. *Agron. J.* 68:403-406.
- SCHOFIELD, P.; PELL, A.N. 1995. Validity of using accumulated gas pressure readings to measure forage digestion in vitro: A comparison involving three forages. *J. Dairy Sci.* 78:2230-2238
- SCHOFIELD, P.; PITT, R.E.; PELL, A.N. 1994. Kinetics of fiber digestion from in vitro gas production. *J. Anim. Sci.* 72:2980-2991.
- SERAFIM, M.V.; BORGES, I.; GONÇALVES, L.C.; RODRIGUEZ, N.M.; RODRIGUES, J.A.S. 2000. Desaparecimento in situ da matéria seca, proteína bruta, fração fibrosa das silagens de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 52:634-640.
- SICILIANO-JONES, J. 2001. Corn silage digestibility issues in testing, management and hybrid selection. <http://www.milkproduction.com/Library/Articles/Corn+Silage_Digestibility_Issues_in_Testing_Management_and_Hybrid_Selection.htm> [Consulta: 05/08/2006].
- SICILIANO-JONES, J. 2002. Using digestibility values in ration formulation. <http://www.milkproduction.com/Library/Articles/Using_digestibility_values_in_ratio_n_formulation.htm> [Consulta: 27/07/2006].
- SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. 1980. *Statistical Methods*, 7th Ed. Iowa State University Press, Ames, USA.
- SOMMERFELDT, J.L.; SCHINGOETHE, D.J.; MULLER, L.D. 1979. Brown-Midrib corn silage for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 62:1611-1618.
- STALLINGS, C.C.; DONALDSON, B.M.; THOMAS, J.W.; ROSSMAS, E.C. 1981. In vivo evaluation of brown-midrib corn silage by sheep and lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 65:1945-1949.
- STRIZLER, N.P.; FERRI, C.M. y JOUVE, V.V. 1997. Comparación de modelos utilizados para estimar la desaparición de la material seca in sacco y la degradabilidad efectiva. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 17:353-364.
- TERASHIMA, N.; FUKUSHIMA, K.; HE, L.F.; TAKABE, K. 1993. Comprehensive model of the lignified plant cell wall. In: Jung, H.G, Buxton, D.R., Hatfield, R.D. y Ralph, J. Ed.

- Forage cell wall structure and digestibility. ASA-CSSASSA, Madison, WI. pp. 247-270.
- THEODOROU, M.K.; WILLIAMS, B.A.; MCALLAN, A.B.; FRANCE, J. 1994. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48:185-197.
- TILLEY, J.; TERRY, R. 1963. A two stages technique for the in vitro digestion of forages crops. *J. Br. Grassland Soc.* 18:104-111.
- TOLERA, A.; SUNDSTØL, F. 1999. Morphological fractions of maize stover harvested at different stages of grain maturity and nutritive value of different fractions of the stover. *Anim. Feed Sci. Technol.* 81:1-16.
- TOLERA, A.; SUNDSTØL, F.; SAID A.N. 1998. The effect of stage of maturity on yield and quality of maize grain and stover. *Anim. Feed Sci. Technol.* 75:157-168.
- TONANI, F.L.; RUGGIERI, A.C.; QUEIROZ, A.C. y ANDRADE, P. 2001. Degradabilidade ruminal in situ da matéria seca e da fibra em detergente neutro em silagens de híbridos de sorgo colhidos em diferentes épocas. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 53:100-104.
- TORRECILLAS, M.G. 2001. Rendimiento y calidad de forraje en híbridos de sorgo granífero en respuesta a diferentes fechas y densidades de siembra. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 21:171-179.
- TREI, J.; HALE, W.; THEURER, B. 1970. Effect of grain processing on in vitro gas production. *J. Anim. Sci.* 30:825-831.
- VALENTIN, S.F.; WILLIAMS, P.E.V.; FORBES, J.M.; SAUVANT, D. 1999. Comparison of the in vitro gas production technique and the nylon bag degradability technique to measure short - and long - term processes of degradation of maize silage in dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 78:81-99.
- VAN GELDER, A.H.; HETTA, M.; RODRIGUES, M.A.M.; DE BOEVER, J.L.; DEN HARTIGH, H.; RYMER, C.; VAN OOSTRUM, M.; VAN KAATHOVEN, R.; CONE, J.W. 2005. Ranking of in vitro fermentability of 20 feedstuffs with an automated gas production technique: Results of a ring test. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124:243-253.
- VAN SOEST, P.J. 1967. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. *J. Dairy Sci.* 119-128.
- VAN SOEST, P.J. 1993. Cell wall matrix interactions and degradation-Session synopsis. In: Jung, H.G, Buxton, D.R., Hatfield, R.D. y Ralph, J. Ed. Forage cell wall structure and digestibility. ASA-CSSASSA, Madison, WI. pp. 377-395.
- VAN SOEST, P.J., 1994. *Nutritional Ecology of Ruminants*, 2nd ed. Cornell University Press, 476 p.
- VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J B.; LEWIS, B.A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597.

- VANDERLIP, R.L.; REEVES, H.E. 1972. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.). *Agron. J.* 64:13-16.
- VAZANT, E.S.; COCHRAN, R.C.; TITGEMEYER, E.V. 1998. Standardization of in situ techniques for ruminant feedstuff evaluation. *J. Anim. Sci.* 76: 2717-2729.
- VILLALBA, S.E. 2001. Producción de gas in vitro. Uso de la técnica para estimar la degradabilidad de los alimentos para rumiantes. Tesis Licenciado en Bromatología. Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Bromatología. Argentina. 51 p.
- WEDIG, C.L.; JASTER, E.H.; MOORE, K.J.; MERCHEN, N.R. 1987. Rumen turnover and digestion of normal and brown midrib sorghum x sudangrass brid silages in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 70-122.
- WEISS, W.P. 1993. Symposium: prevailing concepts in energy utilization by ruminants. Predicting energy values of feeds. *J. Dairy Sci.* 76:1802-1811.
- WEISS, W.P. 1998. Symposium: energy availability. Estimating the Available Energy Content of Feeds for Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.* 81:830-839.
- WHITE, J.S.; BOLSE, K.K.; POSLER, P.; NEILL, J.W. 1991. Forage sorghum silage dry matter disappearance as influenced by plant part proportion. *Anim. Feed Sci. Technol.* 33:313-322.
- WOLIN, M.J. 1960. A theoretical rumen fermentation balance. *J. Dairy Sci.* 43:1452-1459.
- YAN, T.; AGNEW, R.E.; GORDON, F. J. 2002. The combined effects of animal species (sheep *versus* cattle) and level of feeding on digestible and metabolizable energy concentrations in grass-based diets of cattle. *Animal Sci.* 75:141-151.

8. APÉNDICE

Chacra Experimental Coronel Suarez, Ministerio de Asuntos Agrarios de la Pcia. de Buenos Aires.

Ubicación geográfica: Pasman (Ptdo. Cnel. Suárez)

Latitud. 37° 11' Sur

Longitud. 62° 8' Oeste

Altitud. 180 m sobre el nivel del mar.

Suelo:

Orden: Hapludol típico

Materia orgánica:4,5 %

pH:6,5 - 7,3

Fósforo asimilable:7 – 16 ppm

Textura: Franco arcillosa

Presencia de Tosca: a los 40-60 cm de la superficie.

Clima

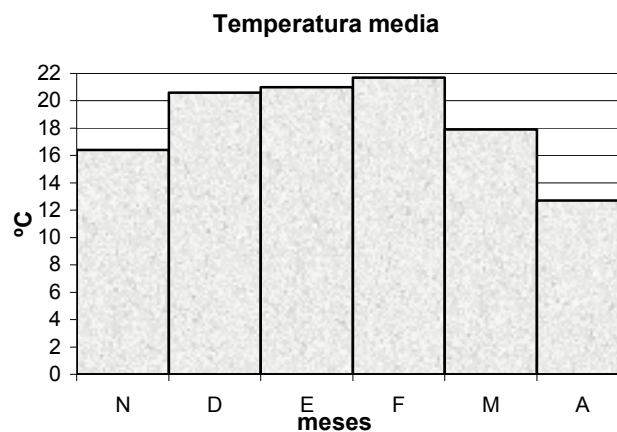


Figura 8.1. Temperatura media (°C) mensual durante la estación de crecimiento de los híbridos de sorgo, en la Chacra experimental Cnel Suarez, Bs. As

Cuadro 1. Heladas sucedidas durante la estación de crecimiento de los híbridos de sorgo, en la Chacra experimental Cnel Suarez, Bs. As.:	
Mes	Número de heladas
2004	
Noviembre	0
Diciembre	0
2005	
Enero	0
Febrero	0
Marzo	0
Abril	2

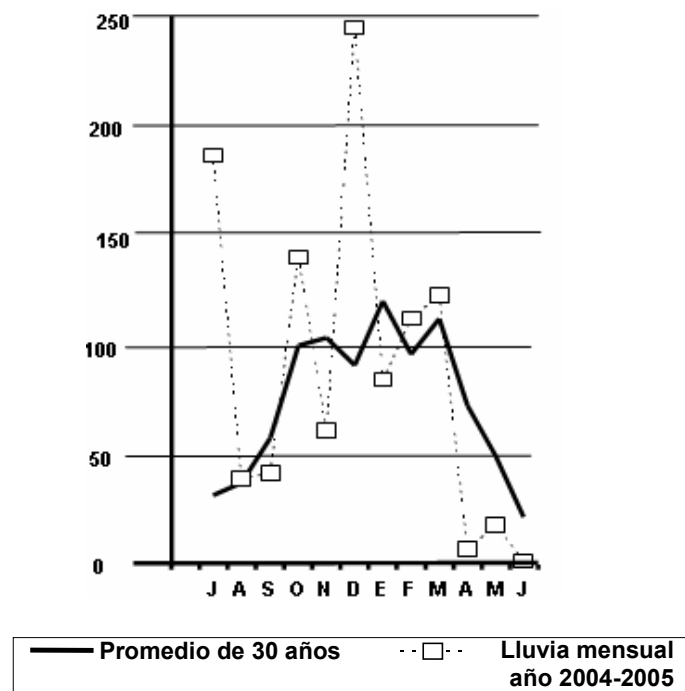


Figura 8.2. Precipitación mensual (mm/mes) durante la estación de crecimiento de los híbridos de sorgo, en la Chacra experimental Cnel Suarez, Bs. As.