Universidad Nacional de Lomas De Zamora

Facultad de Ciencias Agrarias

Tesina

"POTENCIALIDAD DE SORGOS (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) CON APTITUD SILERA COMO FUENTE PRODUCTORA DE BIOETANOL EN RESPUESTA A DIFERENTES FACTORES DE MANEJO"

Jorge Rey, Leandro Daniel

Becario CIN

leandro_jorgerey@hotmail.com

2013

POTENCIALIDAD DE SORGOS (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) CON APTITUD SILERA COMO FUENTE PRODUCTORA DE BIOETANOL EN RESPUESTA A DIFERENTES FACTORES DE MANEJO

Tesina final de grado orientada a Sorgo, factores de manejo, bioetanol y biomasa. Presentada como parte de los requisitos del Espacio de Prácticas Profesionales (Res C.A.A.099), por el alumno Jorge Rey, Leandro Daniel.

Director de Tesina:

- Ing. Agr. (M. Sc.) Torrecillas, Marcelo Gustavo

  Profesor Adjunto - Manejo de Recursos Forrajeros

  Dedicación: Exclusiva

  Facultad de Ciencias Agrarias

  Universidad Nacional de Lomas de Zamora

INDICE GENERAL

Contenido **Página**

INDICE DE FIGURAS V

INDICE DE TABLAS VI

RESUMEN VII

INTRODUCCIÓN 1

Interés General del tema 1

Biomasa energética 1

Bioetanol 1

Producción de Bioetanol en Argentina 3

Elaboración de Bioetanol 3

Cultivo de sorgo como alternativa 6

Biomasa amilácea del sorgo 7

Biomasa azucarada del sorgo 7

Biomasa lignocelulósica del sorgo 8

Cultivares de Sorgo con potencial como fuente productora de bioetanol 10

Respuesta del sorgo a la Fertilización 15

Importancia del momento de corte 17

OBJETIVOS 19

Objetivos específicos: 19

HIPOTESIS 20

MATERIALES Y MÉTODOS 21

Tratamientos 21

- Fertización Nitrogenada (N) 24
- Híbridos (H) 21
- Momentos de corte (MC) 24

Mediciones efectuadas 24

1. Mediciones relacionadas al rendimiento en cantidad de biomasa lignocelulósica: 24
2. Mediciones relacionadas a la calidad de la biomasa lignocelulósica .. 25
3. Mediciones relacionadas a la concentración y calidad de azúcares solubles 26

Análisis estadístico 26

RESULTADOS 27

A. Calidad de la biomasa lignocelulósica 28

B. Rendimiento de la biomasa lignocelulósica 36

C. Rendimiento de la biomasa azucarada 42

DISCUSION 45

CONCLUSION 48

BIBLIOGRAFIA 51

ANEXOS 58

INDICE DE FIGURAS

Contenido **Página**

Figura 1: Contenido de LDA (%) para cada híbrido y momento de corte. 29

Figura 2: Digestibilidad *in vitro* (%) para cada híbrido y momento de corte. 31

Figura 3: Contenido de FDN (%) para cada híbrido y momento de corte. 33

Figura 4: Contenido de FDA (%) para cada híbrido y momento de corte. 34

Figura 5: Rendimiento de materia seca (kg/ha) en función de la dosis nitrogenada (kg Urea/ha). 35

Figura 6: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) en función de la dosis nitrogenada (kg urea/ha). 36

Figura 7: Rendimiento de materia seca (kg/ha) para cada híbrido. 37

Figura 8: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) para cada híbrido. 38

Figura 9: Rendimiento de materia seca (kg/ha) para cada MC. 39

Figura 10: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) para cada híbrido y momento de corte. 40

Figura 11: Contenido de Grados Brix en función del material. 41

Figura 12: Contenido de Grados Brix en función del momento de corte. 43

INDICE DE TABLAS

Contenido **Página**

Tabla I: Características del sorgo dulce y la caña de azúcar 13
(*Raveendran T. S., 2006*)

Tabla II: Calidad forrajera de la fracción vegetativa en seis 17
momentos de corte (Torrecillas et at. 2004)

Tabla III. Características de los distintos híbridos utilizados. 22

Tabla IV. Análisis de Varianza (ANVA) 27

Tabla V. Respuesta de la calidad de la biomasa lignocelulósica 28
ante distintas dosis nitrogenadas

RESUMEN

El potencial del cultivo de sorgo como fuente de materia prima para la producción de biocombustibles presenta aún en la actualidad ciertas interrogantes que deben ser respondidas. El presente trabajo tuvo como objetivo general determinar la respuesta de diferentes híbridos de sorgo con aptitud silera, ante distintos factores de manejo, proyectando un uso potencial para la producción de bioetanol. El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Lomas de Zamora, durante la campaña 2012/2013, utilizándose un diseño de parcelas subdivididas con 3 repeticiones. Las variables analizadas sobre muestras de la fracción vegetativa fueron digestibilidad, componentes de fibra, sólidos solubles totales en jugo, rendimiento de materia seca y rendimiento de materia seca digestible. Se obtuvieron diferencias en el patrón de concentración de azúcares solubles según el tipo de híbrido considerado y el momento de corte, mientras que la modificación en los niveles de nutrición nitrogenada no presentó influencia. Buscando la maximización en el rendimiento de materia seca digestible por hectárea, destacamos la respuesta diferencial según el momento de corte y también, en menor intensidad, de la dosis nitrogenada. Combinando correctamente los factores de manejo, se incrementa la viabilidad del cultivo de sorgo como fuente productora de bioetanol.

Palabras clave: Sorgo, factores de manejo, nitrógeno, biomasa, bioetanol.

INTRODUCCIÓN

Interés General del tema

Biomasa energética

El término biomasa energética hace referencia a toda materia orgánica originada de forma inmediata en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. La biomasa abarca un amplio rango de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad. Se ha estimado que actualmente contribuye entre un 10% y 14% al abastecimiento de la energía mundial (Mc Kendry, 2002).

La biomasa constituye una fuente de energía renovable que no genera residuos de difícil tratamiento y reducen las emisiones de gases causantes del efecto invernadero. Además, permite un cierto grado de almacenamiento, constituye una alternativa realista para la sustitución de los combustibles fósiles en el sector transporte a corto y mediano plazo, favorece el mantenimiento y desarrollo del sector agrícola y forestal y genera beneficios adicionales en el caso de la valorización energética de residuos (Pejó, 2010).

Bioetanol

El bioetanol es un alcohol que se produce a través de la fermentación de azucares reductores provenientes de distintas plantas, siendo la caña de azúcar el cultivo azucarado más ampliamente empleado para este tipo de producción (Limtong *et al*., 2007; Sánchez y Cardona, 2008). En cuanto al

bioetanol producido de cultivos amiláceos, la mayor parte proviene del maíz (Bothast y Schlicher, 2005; Devantier *et al*., 2005) y en menores cantidades del trigo (Wang *et al*., 1999a; Blanco y Saquete., 2008), centeno (Wang *et al*., 1999), cebada (Blanco y Azqueta, 2008) y sorgo (Laopaiboon *et al*., 2007; Zhan *et al*., 2003).

En la actualidad, las principales utilizaciones del bioetanol son como producto sustitutivo de la nafta, mezclado con ésta en distintas proporciones o como aditivo de la misma a través de su transformación a Etil Ter-Butil Éter (ETBE). Este último es un compuesto oxigenado que aumenta el número de octanos y promueve una mejor combustión, reduciendo las emisiones contaminantes por el tubo de escape, como monóxido de carbono, dióxido de carbono y distintos hidrocarburos (Pejó, 2010). Del mismo modo contribuye al cumplimiento del Protocolo de Kyoto (Acuerdo internacional que surgió durante el Convenio sobre Cambio Climático de la ONU, 1997) al ser el CO2 emitido de ciclo cerrado.

El principal problema derivado de la producción de bioetanol es el elevado costo de la materia prima, ya que las biomasas azucaradas y amiláceas están ligadas al mercado alimentario, lo que repercute en el precio final del producto. Además del dilema moral que puede suponer la utilización de productos alimentarios con fines energéticos (Pejó, 2010). No obstante, el bioetanol se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles (Gómez *et al*., 2008).

Producción de Bioetanol en Argentina

De acuerdo a los datos difundidos por la Cámara Argentina de Energía Renovable (CADER, 2012), la producción de bioetanol en Argentina cerró el año 2012 con un incremento del 40% con respecto al año anterior, alcanzando las 187.800 toneladas producidas. Según estimaciones de la consultora abeceb.com, se expandirá hasta las 244.000 toneladas en el año 2013, representando un incremento del 30%. La producción de 2012 habría alcanzado para satisfacer el 3% de las ventas de naftas en el mercado interno, lejos del 5% que el Gobierno Argentino propuso como objetivo de acuerdo a la ley 26.093, sancionada el año 2007 (Rafele, 2013).

Existe la intención de impulsar por parte del gobierno un proyecto que propone duplicar el corte de bioetanol en naftas para el año 2014, alcanzando un corte de 10% con combustibles orgánicos (Cayón, 2013). Esto implica que será necesario incrementar fuertemente la producción de bioetanol para satisfacer su requerimiento como combustible.

Elaboración de Bioetanol

El bioetanol se elabora por tres vías posibles (figura 1):

a) Directamente a partir de *biomasa azucarada*: productos agrícolas ricos en azúcares, tales como la remolacha azucarera, la caña de azúcar y en los últimos tiempos el sorgo dulce.

La fermentación alcohólica es una bio-reacción en plena ausencia de aire, que permite convertir azúcares en alcohol (C_2H_6O) y dióxido de carbono (CO_2). Las principales responsables de esta transformación son las levaduras y dentro de

estas son utilizadas generalmente cepas de Sacharomyces cerevisiae (Garro *et al*., 1995).

b) Mediante hidrólisis convencional (moderada y enzimática) de *biomasa amilácea*: productos agrícolas ricos en almidón, tales como los granos de cereales. A través del proceso de hidrólisis se consigue aflorar los azúcares, glucosa y/o fructosa, que formarán parte del mosto azucarado.

c) Mediante un pretratamiento térmico y luego una hidrólisis fuerte (ácida o enzimática) de *biomasa lignocelulósica*: productos agrícolas que contienen celulosa, lignina y hemicelulosa. El pretratamiento debe disociar el revestimiento que la lignina y la hemicelulosa forman alrededor de la celulosa con el fin de aumentar la accesibilidad de ésta a las enzimas, alterar las características estructurales de la celulosa, y provocar la solubilización y/o redistribución de la lignina (Wyman *et al*., 2005).

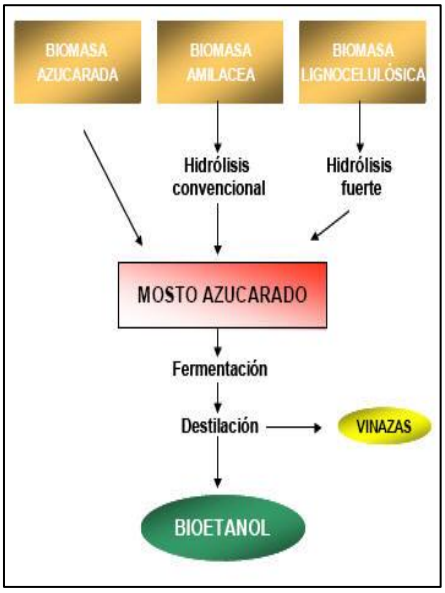

Figura 1. Esquema representativo de las tres vías posibles de producción de bioetanol (Fuente CNE)

Las dos primeras vías son las más empleadas en la actualidad. Por el contrario, la producción de bioetanol a partir de materias lignocelulósicas, también llamado bioetanol de segunda generación, se presenta una alternativa en el futuro a los biocombustibles de primera generación (originados a partir de biomasa amilácea y azucarada).

Para lograr un precio competitivo del bioetanol se deben reducir los precios de las materias primas, ya que éstas pueden llegar a suponer un 60-70% del costo final del etanol (Wyman, 1999). En ese contexto, los biocombustibles de segunda generación son producidos a partir de biomasa de bajo costo y abundante, y cuya producción mundial potencial se ha calculado en 16 veces más alta que la actual producción a partir de almidón o azúcares (Kim y Dale, 2004). Además, la biomasa lignocelulósica no compite con el mercado alimentario (Pejó, 2010).

En el futuro, deberá utilizarse no sólo el almidón del grano sino también la celulosa y hemicelulosa del resto de la planta, aprovechando que los cultivos generan una gran cantidad de biomasa aérea, de la cual aproximadamente el 60% (caña + hojas) permanece como rastrojo. Bajo tales perspectivas, se estudia el grado potencial de erosión del suelo provocado por la remoción de rastrojos de cultivos, habiéndose demostrado que recolectar el 30 % del mismo no generaría problemas de erosión (Graham *et al*., 2007).

Cultivo de sorgo como alternativa para la elaboración de bioetanol

El sorgo es un cultivo multipropósito que provee grano y tallos que pueden ser utilizados para la producción de azúcar, alcohol, jarabe, biocombustible, papel y alimentación animal en todas sus variantes (forraje en verde, silaje, henos, diferidos, etc.) (Doggett, 1988).

La incorporación de este cultivo como materia prima, en todas sus variantes (biomasa azucarada, amilácea y lignocelulósica), aportaría un volumen de bioetanol que permitiría aproximarse al corte actual del 5 % en las naftas.

Algunos atributos morfofisiológicos que determinan que el cultivo de sorgo sea considerado una alternativa válida y crecientemente empleada son:

1) Mayor capacidad de absorción de humedad del suelo y mayor eficiencia en su utilización que el maíz (Salih *et al*., 1999).

2) Mecanismo de latencia durante períodos prolongados de sequía, y capacidad para retomar luego el crecimiento (aunque sin recuperar el potencial de rendimiento total) (Johnson y Turner, 1978).

3) Elevada calidad nutricional del componente vegetativo (Osafo *et al*., 1994, Rattunde *et al*., 2001).

4) Adaptación a suelos de baja fertilidad, salinos e inundables (Holland *et al*., 1996), con elevada acidez y problemas de toxicidad por exceso de aluminio en la solución del suelo (Maunder, 2002).

5) Elevada capacidad de rebrote en algunos genotipos, con posibilidad de segundo corte de la fracción vegetativa.

6) Bajo costo de implantación.

Los resultados emergentes de este proyecto contribuirán a esclarecer aspectos de manejo poco estudiados en esta especie y respectivo destino productivo (producción de bioetanol). Debido a que existe escasa información en nuestro país y en zonas agroecológicas similares a nuestro medio, dichos resultados se constituirán como antecedentes en esta área de trabajo, brindando información acerca de la potencialidad del cultivo de sorgo enfocado a la producción de biocombustibles.

Tipo de sustratos para la elaboración de bioetanol a partir del sorgo

1. Biomasa amilácea del sorgo

En la actualidad, el bioetanol obtenido por conversión del almidón del grano de sorgo en azúcar fermentable (glucosa obtenida por hidrólisis enzimática y su posterior fermentación a etanol) es el proceso más utilizado, de entre los diferentes sustratos que ofrece el cultivo de sorgo.

2. Biomasa azucarada del sorgo

Existen dos parámetros importantes que hacen a la potencialidad de la biomasa azucarada de un sorgo como fuente productora de bioetanol: su rendimiento en término de volumen de jugo azucarado producido por hectárea, y la concentración y calidad de azúcares solubles de dicho jugo.

Se pueden realizar estimaciones de la concentración de azúcares solubles determinando los grados Brix (°Brix). Los mismos incluyen principalmente a azúcares, pero también a otros compuestos.

El contenido real de azúcar presente en el jugo de la caña de sorgo incluye a la sacarosa y a azucares reductores (fructosa y glucosa). Un menor nivel de azúcares reductores indica que la mayoría de ellos han sido convertidos en sacarosa. Dichos componentes pueden estimarse mediante el método de fehling modificado de Lane y Eyron (1923). Las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa dependen de la variedad, momento de corte, etapa de madurez, entre otros factores (Mamma *et al.,* 1996). También se encuentran en cantidades muy pequeñas otros hidratos de carbono no fermentables como el almidón (FAO 2004).

3. Biomasa lignocelulósica del sorgo

El potencial de producción de bioetanol a partir de la fracción vegetativa del cultivo de sorgo es función de la cantidad de carbohidratos disponibles y de la convertibilidad de los mismos a azúcares fermentables. Esto último varía según los métodos usados para el pretratamiento y la hidrólisis (Dien *et al*., 2006).

La calidad nutritiva de la fracción vegetativa en sorgos ha sido históricamente poco considerada. La pared celular vegetal es una matriz compleja constituida de polisacáridos (celulosa, hemicelulosa, pectinas) y lignina. Los hidratos de carbono estructurales que la constituyen están interrelacionados. La fracción de Fibra Detergente Neutro (FDN) se compone de hemicelulosa, celulosa y lignina, mientras que la de Fibra Detergente Ácido (FDA) incluye celulosa y lignina (Van Soest, 1965). La celulosa y hemicelulosa de los forrajes son totalmente digeridas por los microorganismos del rumen, mientras que la lignina es casi indigestible y además inhibe la digestión de otros constituyentes

orgánicos. El contenido de lignina es el principal factor que determina la degradación de la pared celular (Torrecillas, 2006).

Otros factores que contribuyen a la caída de la digestibilidad son la composición bioquímica de la lignina *per se*, la tenacidad de las uniones entre los alcoholes cinámicos constituyentes, la naturaleza de los ácidos cinámicos que están ligados a la lignina y la frecuencia de enlaces, mediados por el ácido ferúlico, entre lignina y hemicelulosa (Barrière *et al*., 1997). Las gramíneas en particular, tienen alta concentración de los ácidos hidroxicinámicos (ferúlico y p-cumárico) en sus paredes celulares, lo que impacta negativamente sobre la digestibilidad.

A su vez, se ha hallado que la concentración de lignina es un excelente indicador de la madurez de la planta. La concentración de lignina se incrementa en las paredes de células especializadas y tejidos que han cesado su crecimiento y están involucrados en el soporte mecánico (esclerénquima), conducción (xilema) ó protección (peridermis), lo cual es esperable que ocurra con los sucesivos estados fenológicos (Boudet, 1998). La lignina interacciona con los demás polisacáridos disminuyendo el valor nutricional del forraje y la aptitud de la biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol (Grabber, 2005), incrementando la resistencia de los tejidos a la acción de enzimas hidrolíticas (Jung y Casler, 2006).

Pedersen *et al*. (2005), han encontrado que la reducción en el contenido de lignina generalmente va acompañada por una concomitante reducción en la biomasa, por consiguiente cualquier reducción de ésta debería estar compensada por un incremento en el rendimiento de azúcares totales fermentables.

Por otro lado, el tejido vegetativo fue tradicionalmente considerado como la fuente de captación de energía necesaria para alcanzar un rendimiento óptimo de grano. A pesar de ello, el principal objetivo de los programas de mejoramiento genético en los cultivos con el propósito de bioenergía es maximizar el rendimiento de la fracción vegetativa, la cual es altamente productiva *per se*. La modificación de la arquitectura de la planta tiene gran potencial para mejorar la producción de biomasa total y específicamente la altura de planta es un componente importante de la arquitectura que está altamente correlacionado con el rendimiento de biomasa. Nuevos objetivos de mejoramiento e ideotipos de planta deberán establecerse para los sistemas de producción destinados a biocombustibles.

Tipos de Sorgo con potencial como fuente productora de bioetanol

En la actualidad existen numerosos destinos posibles para el cultivo de sorgo (grano, silaje, forraje, bioetanol, etc.) y a su vez diferentes biotipos utilizables (híbridos sileros, híbridos fotosensitivos, híbridos graníferos, híbridos con o sin *Stay-Green*, BMR, etc.) en función del objetivo buscado.

Algunas características de importancia que deberían considerarse cuando se elige un híbrido de sorgo, compatible con la producción de biomasa azucarada y lignocelulósica (potencialmente bioetanol) son:

1) Alto potencial de rendimiento de materia seca de la planta entera.
2) Longitud de ciclo adecuada para el ambiente de producción considerado.
3) Elevada digestibilidad de la fracción vegetativa.
4) Bajo porcentaje de vuelco.
5) Resistencia a plagas y enfermedades.

6) Elevada capacidad de rebrote y macollaje.
7) Tallos con alto porcentaje de extracción de jugo,
8) Alto contenido de azúcares fermentables totales en jugo.

Los sorgos potencialmente aptos para producción de bioetanol a partir de la biomasa azucarada y/o lignocelulósica presentan similitudes a los utilizados para silaje:

- **Híbridos sileros *fotosensitivos*:** en óptimas condiciones de cultivo, pueden alcanzar alturas de 4 m y debido a que responden al fotoperíodo (12hs, 20') para desencadenar la floración, se los aprovecha sin panoja. Poseen alto contenido de azúcares solubles en tallo y un alto stay-green, pero un bajo contenido de materia seca (Torrecillas, 2006).
- **Híbridos sileros – *graníferos*:** Se diferencian de otros híbridos sileros por su producción de granos. Presentan una gran variabilidad de características morfofisiológicas como altura, contenido de taninos, color de planta y color del grano. Además, diferentes ciclos determinan diferentes alturas de planta y distinta capacidad de macollaje. Normalmente los híbridos de ciclo largo son altos y macolladores (Torrecillas, 2006).
- **Híbridos sileros *BMR*** (*Brown Mid Rib*, nervadura central marrón): Sorgos que gracias a una mutación genética presentan un menor contenido de lignina en su estructura vegetativa, con una reducción de aproximadamente 50% de dicho componente estructural (Torrecillas, 2006). El contenido de lignina presenta una correlación negativa y significativa con la digestibilidad. Entonces la digestibilidad de estos materiales se ve aumentada. La caída en los valores de digestibilidad y proteína a medida que madura el cultivo es menor comparada con los tipo sudan y fotosensitivos. Boudet (1998) resalta

la diferente distribución de la lignina y su enlace con los con los otros carbohidratos estructurales (hemicelulosa y celulosa) en estos híbridos. En diversos ensayos (Torrecillas y Bertoia, 2008), los materiales BMR a pesar de registrar menores valores de rendimiento de materia seca, en general logran equiparar e incluso superar el rendimiento de materia seca digestible de los no BMR, gracias a la mayor digestibilidad que presentan.

- **Híbridos sileros *stay-green***: Son materiales que pueden diferenciarse por la capacidad de mantener verde su estructura vegetativa en etapas avanzadas de madurez, atributo usualmente denominado "*stay-green"* (Thomas y Howarth, 2000). Es posible definir el nivel de *stay-green* utilizando como criterio la comparación de la senescencia foliar retrasada con un genotipo estándar de referencia. Esta característica le confiere a la planta mayor resistencia al vuelco y al mismo tiempo mantiene por más tiempo la calidad forrajera de la fracción vegetativa mientras se produce la maduración de los granos. En los materiales con *stay-green* se presentaría un período mayor de aprovechamiento, en especial, cuando éste se determina exclusivamente sobre la base de caracteres de la fracción vegetativa (híbridos fotosensitivos). Por otro lado, la diferente capacidad de acumular azúcares solubles en la caña también está ligada al grado de *stay-green* de la fracción vegetativa (Torrecillas, 2006).
- **Híbridos azucarados**: Denominados también como "*Sorgos dulces*", presentan un tallo rico en azúcares, casi similar a la caña de azúcar. El contenido de azúcar en el jugo extraído del sorgo dulce puede variar de 16-23 grados Brix. Esta característica representa una ventaja para usos específicos como es la producción de bioetanol.

Es producido principalmente en los Estados Unidos, utilizándose para la industria alimentaria como sustituto del azúcar. El 10-20% de la producción de sorgo dulce de Estados Unidos se utiliza actualmente para la producción de bioetanol, y su empleo está aumentando rápidamente (sobre ocho mil millones Litros/año) (Maunder, 2006).

En general, las variedades de sorgo dulce tienen un rendimiento bajo en grano, pero se han desarrollado recientemente en India y en China variedades con una relación más equilibrada grano/producción de azúcar (Intelligent Energy Europe 2012).

Si estableciéramos una comparación en aspectos técnicos (Tabla I) del cultivo de caña de azúcar con el de sorgo dulce, podríamos ser concluyentes en los siguientes puntos: la caña de azúcar presenta menor resistencia a períodos de sequía prolongado, menor velocidad de crecimiento, mayor consumo de agua y nutrientes para un mismo nivel de rendimiento y mayor demanda de mano de obra (siembra con esquejes).

Tabla I: Características del sorgo dulce y la caña de azúcar (Raveendran, 2006)

Tipo de cultivo	**Sorgo dulce**	**Caña de azúcar**
Parámetro	**Valor**	
Requerimientos de agua (durante el ciclo)	8.000 m3	36.000 m3
Días para florecer	75 días	85 días
Días para madurar	100 días	115 días
Altura de la planta	280 cm.	340 cm.
Promedio del peso de la caña	380 g/plant	528 g/plant
Rendimiento de la caña	35 t/ha	50 t/ha
Extractabilidad del jugo	40 %	50 %
Grados Brix	16-23 ºBrix	19-26 ºBrix
Sólidos totales solubles	13 %	15,2%
Azucares reducidos	1,3 %	2,1 %
Sacarosa	9,6 %	13,6 %
Rendimiento de alcohol	2500 lit / ha	4000 lit / ha

Además se pueden mencionar las siguientes fortalezas del cultivo:

- Presenta menores riesgos de producción bajo condiciones edafo-climáticas adversas.
- Su ciclo de 90-120 días, en algunas zonas, posibilita dos cortes.
- Existen alternativas de utilización de los subproductos (bagazo, forraje) (Reddy *et al*., 2005).

- El bagazo resultante de la extracción de jugo es comparativamente superior en cuanto a la composición de micronutrientes y minerales, con respecto a la caña de azúcar (Seetharama *et al.*, 2002).

Factores de manejo del cultivo

A. Respuesta del sorgo a la Fertilización Nitrogenada

Los requerimientos nutricionales del cultivo son bajos al inicio del ciclo. La absorción de los mismos aumenta de manera significativa a partir de que la planta tiene 5-6 hojas verdaderas (20-30 días post-emergencia hasta los 10 días previos a la floración). Por lo tanto, un buen aporte nutricional desde los primeros estados de desarrollo produce una cantidad suficiente de área foliar para interceptar mayor cantidad de radiación incidente y asegurar así una alta eficiencia para transformarla en biomasa (Torrecillas y Bertoia, 2008). Comparado con otros cultivos como el maíz, el rendimiento del sorgo no es tan afectado por la baja fertilidad de los suelos, aunque por otro lado su respuesta a la mejora ambiental es menor.

Existe una serie de factores que influyen en la disponibilidad de los distintos nutrientes. La mayoría se encuentran disponibles a un pH entre 6 y 7, mientras que los suelos de las principales regiones agrícolas presentan un pH cercano al 5. Las condiciones ambientales como temperatura y humedad en el suelo pueden provocar importantes pérdidas de los fertilizantes nitrogenados aplicados. La aplicación conjunta de fósforo y nitrógeno mejora la absorción del primero, por lo tanto es importante un balance adecuado de ambos elementos (Fontanetto y Keller, 2003).

Zhao *et al.* (2005), mencionan que con una correcta fertilización nitrogenada, el cultivo de sorgo responde con un aumento del área foliar y el contenido de clorofila en hojas, mejorando la actividad fotosintética del cultivo, lo que se refleja en la producción de biomasa. Por lo tanto, a menor dosis nitrogenada se reduce el rendimiento.

Los resultados obtenidos por diferentes autores mostraron valores contrastantes de las dosis adecuadas de nitrógeno para maximizar el rendimiento en sorgos categorizados como forrajeros. Summer *et al.* (1965) determinó una dosis de 227 kg N/ha, mientras que la misma fue de 50 a 100 kg N/ha para los resultados encontrados por Singh *et al.* (1988) y de 300 kg N/ha para Han y Kin (1992). Esta gran disparidad en las dosis óptimas puede ser explicada en función de la fertilización de los suelos, tipos de híbridos utilizados y la cantidad de cortes efectuadas (Torrecillas y Bertoia, 2008). Asimismo, los resultados obtenidos por ellos sobre sorgo forrajeros, no encontraron respuesta significativa sobre el rendimiento de materia seca y materia seca digestible a partir de los 50kg N/ha. Este dato es coincidente con el hallado por Oikeh *et al.* (2007), quienes encontraron que niveles de N mayores a 60 kg N/ha tuvieron poco beneficio adicional sobre el mismo parámetro.

Sin embargo, Kilcer *et al.* (2002) y Kettering *et al.* (2004), quienes evaluaron sorgos forrajeros BMR encontraron respuestas crecientes en la acumulación de forraje hasta una dosis de 200 Kg N/ha.

Muchow (1998), resalta la importancia de tener en cuenta la disponibilidad inicial de nitratos y el requerimiento de N del cultivo como requisitos para el desarrollo de estrategias de manejo con el objetivo de maximizar la respuesta al agregado de N.

En cuanto al efecto de la fertilización nitrogenada sobre la calidad de la biomasa lignocelulósica del sorgo, existe una limitada cantidad de información. Torrecillas y Bertoia (2008), detectaron diferencias significativas en respuesta a diferentes dosis de nitrógeno para la mayoría de las variables relacionadas con la calidad. A medida que se incrementaron la dosis, la digestibilidad y el contenido de proteína bruta aumentaron, mientras que el contenido de FDA (%) y LDA (%) disminuyeron..

El efecto del nitrógeno sobre la biomasa azucarada recién ha sido estudiado en los últimos años. En este sentido, algunos trabajos indican que la aplicación de nitrógeno disminuye el contenido de carbohidratos solubles (Almodares *et al*., 2009). Dichos autores reconocen la existencia de una relación inversamente proporcional entre la producción de biomasa total y el contenido de azúcares durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo. En otros estudios (Martinez *et al*., 2012), no se observó tal relación.

B. Importancia del momento de corte

El momento de corte define la calidad y el rendimiento del cultivo cosechado. Considerando al bioetanol como destino final se observa que la información generada ha sido muy escasa. Se pueden hacer ciertas extrapolaciones de algunos resultados experimentales encontrados para un uso final del cultivo de sorgo como silaje.

Torrecillas *et at*. (2004) determinaron que con cortes tempranos (50% de floración) sobre híbridos graníferos se logra la mayor digestibilidad y que a partir del corte en estado pastoso duro, se logran los mayores valores de FDN(%) y FDA (%) (Tabla II).

Tabla II: Calidad forrajera de la fracción vegetativa en seis momentos de corte (Valores promedio de 4 híbridos y 4 ambientes) (Torrecillas *et at*. 2004)

	50% floración	Lechoso temprano	Lechoso tardío	Pastoso blando	Pastoso duro	Madurez fisiológica
Tallo + Hojas						
Divt (%)	49.5 a	46,8 b	41,9 c	34,4 d	33,6 d	31,7 e
FDNt(%)	65,6 c	66,3 d	68,2 c	71,6 b	72,5 a	72,6 a
FDAt(%)	41,4 d	42,2 c	44,1 b	46,6 a	46,4 a	46,2 a
Pt (%)	4,1 a	3,9 a	4,1 a	4,1 a	4,2 a	4,2 a
Dentro de cada fila, valores seguidos de la misma letra no difiernen al nivel p 0,05(test DMS)						

A su vez, la máxima producción de materia seca en híbridos forrajeros se alcanza en la fecha más tardía (Romero *et al*.,1998).

Cuando se analiza el efecto del momento de corte sobre la biomasa azucarada se observó que durante el desarrollo de la planta de sorgo el contenido en azúcares varía al madurar la planta (Wall y Ross 1975). Los resultados experimentales encontrados muestarn contradicciones en lo referente al estado del cultivo en que se alcanza el máximo contenido de azucares. Algunos autores (Gutiérrez *et al*., 2011) mencionan a la etapa comprendida entre los 15 días después de la floración hasta los 45 días posteriores, como el periodo donde se alcanza el máximo rendimiento de azucares, mientras otros citan a estadíos más tempranos (Miralles *et al.,* 2011). Por otro lado, también se determinó a la madurez fisiológica como el estadío de mayor contenido de azúcares (FAO, 2004).

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es estudiar el comportamiento del sorgo con aptitud silera, en cuanto a la producción de biomasa azucarada y lignocelulósica (con potencial de elaboración de bioetanol), buscando la mejor combinación posible entre fertilización nitrogenada y momento de corte.

Objetivos específicos:

A. Biomasa Lignocelulósica.

1. Evaluar diferentes tipos contrastantes de híbridos con destino silero para su producción, en cantidad y calidad, de biomasa lignocelulósica.
2. Estudiar la respuesta (en cantidad y calidad) de la producción de biomasa lignocelulósica, como consecuencia de diferentes dosis nitrogenadas.
3. Determinar la respuesta (en cantidad y calidad) de la producción de biomasa lignocelulósica, ante distintos momentos de corte contrastantes.

B. Biomasa Azucarada.

1. Evaluar diferentes tipos contrastantes de híbridos con destino silero para su producción de biomasa azucarada.
2. Estudiar la respuesta de la producción de biomasa azucarada, como consecuencia de diferentes dosis de fertilizante.
3. Determinar la respuesta de la producción de biomasa azucarada, ante distintos momentos de corte contrastantes.

HIPOTESIS

A. Biomasa Lignocelulósica.

- Hipótesis A.1: En sorgo la aptitud para la producción de bioetanol está fuertemente condicionada por el genotipo.

- Hipótesis A.2: Una deficiente nutrición nitrogenada incide negativamente sobre la acumulación y composición de la biomasa lignocelulósica.

- Hipótesis A.3: Existen diferencias cuantitativas y cualitativas en la producción de biomasa lignocelulósica según el momento de corte considerado.

B. Biomasa Azucarada.

- Hipótesis B.1: Existen diferencias en la producción de biomasa azucarada, según el híbrido considerado.

- Hipótesis B.2: Existe una correlación negativa entre la fertilización nitrogenada y la acumulación de la biomasa azucarada.

- Hipótesis B.3: Existen diferencias en el patrón de concentración de azúcares solubles (biomasa azucarada) según el momento de corte, aumentando hacia la madurez.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (Virrey del Pino, Partido de La Matanza, Provincia de Buenos Aires). La preparación del terreno se llevó a cabo mediante labranza convencional, sobre un suelo con 3,2 % de Materia Orgánica (MO), 38,1 ppm de Fósforo (P) extractable y 0,2 % de Nitrógeno (N) total; y cuyo cultivo antecesor fue sorgo granífero. Se sembró el 20 de noviembre del 2012.

El control de malezas y plagas consistió en la aplicación de:

- Atrazina: Herbicida de acción sistémica y residual. Control de malezas anuales de hoja ancha. Dosis 3 l/ha
- S-metolacloro: Herbicida de pre-siembra. Control de malezas anuales de hoja angosta y algunas de hoja ancha. Dosis 1,5 l/ha
- Clorpirifos: Insecticida. Dosis 0,5 l/ha
- Halosulfuron metil: Herbicida. Dosis 50 a 75 gr/ha.

Las dimensiones de la parcela experimental fueron de 26 x 19 m, con una distancia entre hileras de 0,50 m.

Tratamientos

- Híbridos (H)

Los híbridos sileros fueron seleccionados en base a diferencias en ciclo ontogénico, origen genético-comercial, arquitectura de la planta y

características morfofisiológicas, como se detalla en la tabla III. Los mismos pueden ser visualizados en las imágenes 2 y 3.

Tabla III. Características de los distintos híbridos utilizados.

Características	**Sugargraze** (Advanta) (1)	**ADV 2900** (Advanta) (1)	**Green Feed** (San Pedro) (3)	**Tob 80 Sil** (Tobin) (4)
Tipo	Silero Tallos dulces	Silero Fotosensitivo, BMR, tallos dulces	Silero Fotosensitivo	Silero Granífero
Ciclo	Largo	Fotosensitivo	Largo	Intermedio - Largo
Días a Floración	95	135	110 - 130	
Altura (cm)	300	320/350	400 - 430	190 - 250
Comportamiento a vuelco y quebrado	Muy Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Tipo de panoja	Semi compacta	-	-	Compacta (15 – 20% granos/MS total)
Grados Brix	17,5 - 18,5 (2)	17,5 - 18,5 (2)	"Alto"	-

(1) Datos de Venado Tuerto, obtenidos desde www.advantasemillas.com.ar. Densidad a cosecha: Más de 180.000 plantas por hectárea en condiciones de Alta Tecnología.
(2) Valores registrados en jugo de la parte media del tallo, estado del grano pastoso.
4) Datos obtenidos desde www.sanpedrosemillas.com.ar y www.tobin.com.ar respectivamente

Imagen 2. Híbridos de sorgo (Marzo, 2013)

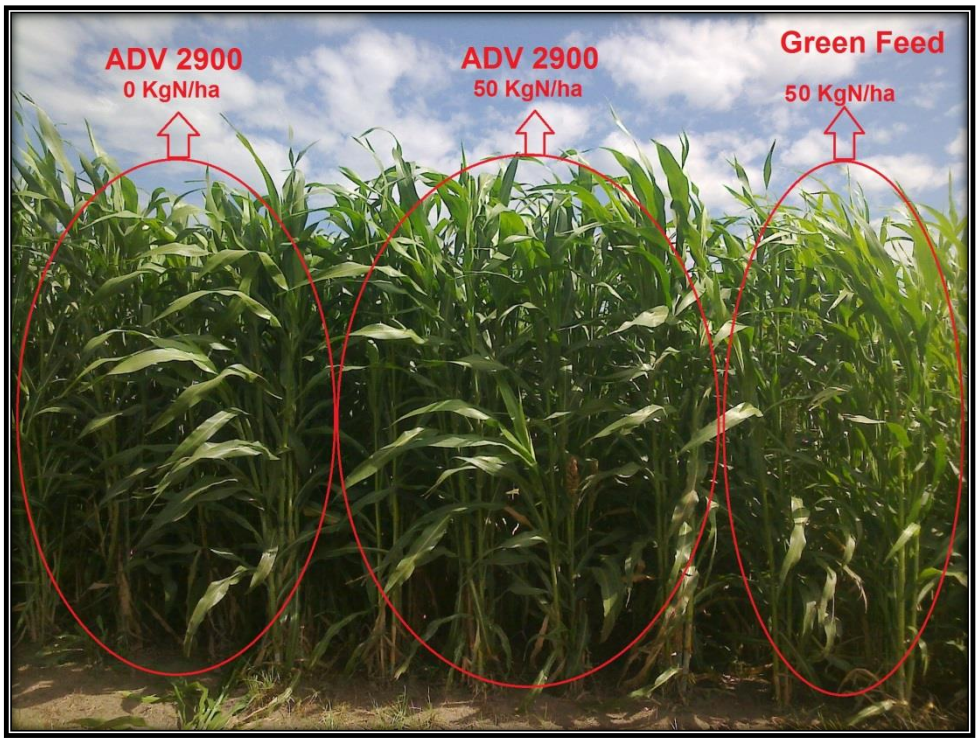

Imagen 3. Híbridos de sorgo (Marzo, 2013)

- Fertización Nitrogenada (N)

Se evaluaron tres dosis de N contrastantes: 0, 50 y 150 kg/ha de urea aplicados en el surco, durante el estadio fenológico de E_4 (Vanderlip, 1972).

- Momentos de corte (MC)

Se efectuaron 4 momentos de corte: 01/03/2013 (MC1), 18/03/2013(MC2), 19/04/2013 (MC3) y 17/05/2013 (MC4). El criterio utilizado fue el de poder estudiar las variaciones en la respuesta del cultivo según avanza el estado fenológico.

Debemos aclarar que solo para algunas variables se efectuaron los 4 MC. Para variables referidas a la cantidad de biomasa lignocelulósica se tomaron en cuenta el MC 1 y el MC 3. Mientras que en variables que miden la calidad de dicha biomasa se analizaron el MC 1, MC 2 y MC3. Solo se efectuaron los 4 MC para las mediciones efectuadas sobre los °Brix.

Mediciones efectuadas

1. Mediciones relacionadas al rendimiento en cantidad de biomasa lignocelulósica:

La metodología de cosecha, para cada momento de corte, consistió en cortar veinte plantas provenientes de los dos surcos centrales en estado de "competencia completa" (condición en la cual se compite por los recursos ambientales en iguales condiciones con sus plantas vecinas). Luego se despanojaron y pesaron. De esta manera se determinó el rendimiento de materia verde de la fracción vegetativa por parcela.

Se tomaron muestras de la fracción tallo+hojas, correspondiente a la parte central de dos plantas por parcela. Las muestras fueron secadas en una estufa de ventilación forzada con una temperatura de 60ºC hasta alcanzar peso constante. De este modo, se obtuvo el porcentaje de materia seca, y se calculó el Rendimiento de Materia Seca (RMS) de dicha fracción por parcela.

2. Mediciones relacionadas a la calidad de la biomasa lignocelulósica

Sobre las muestras molidas (tamaño de partícula de 1mm) obtenidas de tallo+hojas se realizaron las siguientes determinaciones de calidad:

- Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (%).
- Contenido de FDN (Fibra Detergente Neutro) (%).
- Contenido de FDA (Fibra Detergente Ácido) (%).
- Contenido de LDA (Lignina Detergente Ácido) (%).

Los análisis de calidad antes mencionados se llevaron a cabo mediante el uso de NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy). Las curvas de calibración existentes para dichos parámetros de calidad han sido construidas basadas en las siguientes técnicas de referencia:

a) Digestibilidad *in vitro*: Método de solución enzimática (pepsina + celulasa), utilizando bolsitas filtrables (Vogel *et al*., 1999) en un incubador Daisy II (ANKOM).
b) FDN, FDA y LDA: Sus determinaciones se realizaron usando el analizador de fibra ANKOM220 (ANKOM technology Corp., Fairport, NY) (Vogel et al. 1999).

3. Mediciones relacionadas a la concentración y calidad de azúcares solubles (biomasa azucarada)

- *Sólidos solubles totales en jugo:*

Se perforaron en el campo un mínimo de 5 plantas por parcela, en la parte media de las mismas, y se recolectó su jugo para formar una muestra compuesta. Luego se colocó una gota del jugo compuesto en un refractómetro manual y se llevó a cabo la medición de los grados Brix (°Brix). Los °Brix del jugo (contenido de sólidos solubles totales presentes en el jugo) fueron expresados como porcentaje.

- *Sacarosa y azúcares reductores del Jugo:*

La determinación se llevó a cabo en laboratorio mediante el método de fehling modificado de Lane y Eyron (1923).

Metodología estadística

En el análisis conjunto de las 3 variables de manejo se empleó un diseño de parcelas subdivididas con tres repeticiones, donde el híbrido constituyó la parcela principal, y la dosis de N y el momento de corte las subparcelas.

Los datos se analizaron mediante la utilización del procedimiento GLM del programa estadístico SAS (versión 9.1.3). Las comparaciones entre medias se realizaron mediante la utilización del test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) con un nivel de significancia de $p<0,05$.

RESULTADOS

Tabla IV. Análisis de Varianza (ANVA)

	RMS/ha	Digestibilidad *in vitro* (%)	Contenido de FDN (%)	Contenido de FDA (%)	Contenido de LDA (%)	RMSD/ha	°Brix
MC	*	*	*	*	*	*	*
N	NS	NS	*	*	NS	NS	NS
H	NS	*	*	*	*	NS	*
MC × N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
MC × H	NS	*	*	*	*	NS	NS
N × H	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N × H × MC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

*: Significativo a nivel de p<0,05; NS: No Significativo.

En la tabla IV (tabla ANVA) se muestran los efectos y variables que son o no significativos.

Los resultados de cada tratamiento detallados a continuación, serán agrupados de acuerdo a la variable dependiente objeto de análisis.

Por cuestiones prácticas, en los casos donde se presente interacción entre tratamientos, los mismos serán representados en una misma figura.

A. Calidad de la biomasa lignocelulósica

Tabla V. Respuesta de la calidad de la biomasa lignocelulósica ante distintas dosis nitrogenadas.

Tratamiento		Digestibilidad *in vitro* (%)	Contenido de FDN (%)	Contenido de FDA (%)	Contenido de LDA (%)
Dosis N (kg/ha)	0	54.36 **A**	63.94 **A**	36.69 **A**	3.99 **A**
	50	53.03 **A**	63.29 **AB**	36.11 **AB**	3.80 **A**
	150	52.91 **A**	62.40 **B**	35.64 **B**	3.89 **A**

Al observar la tabla IV, se evidencia que para los parámetros relacionados con la calidad de la biomasa como Digestibilidad *in vitro* (%), la fertilización N no produjo diferencias de significancia. Esta respuesta podría entenderse si observamos que dicho tratamiento tampoco tuvo efecto significativo en el contenido de LDA (%), componente que presenta una correlación negativa y significativa con la digestibilidad.

Para los parámetros como FDN (%) y FDA (%), se puede observar una merma estadísticamente significativa en el contenido de dichas fibras ante el aumento de la dosis N. Pero dicha variación carece de importancia numérica (la merma promedio apenas superó el 1%).

Una disponibilidad inicial alta de N en el suelo, podría ser el principal factor que explicaría el escaso efecto de la fertilización N sobre la calidad de la biomasa lignocelulósica.

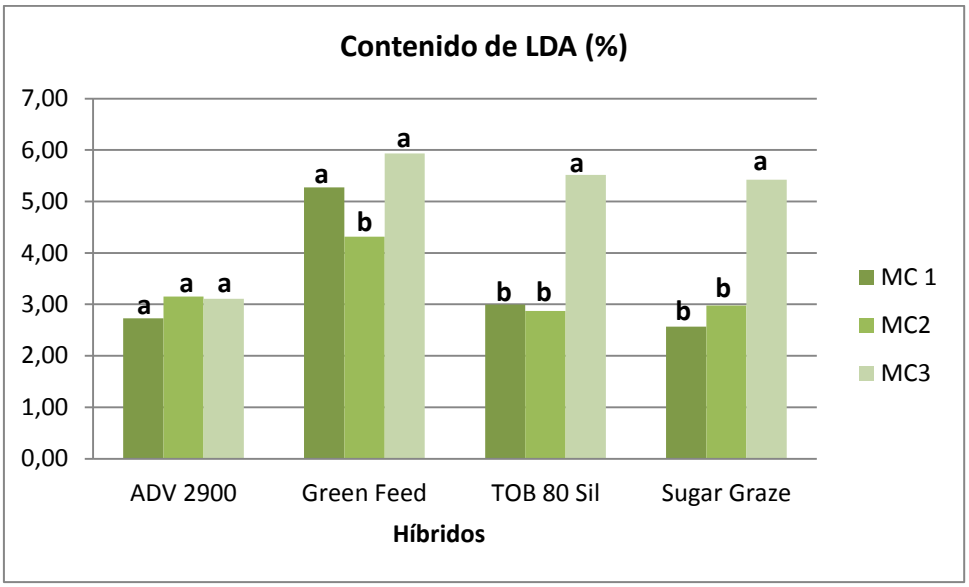

Figura 1: Contenido de LDA (%) para cada híbrido y momento de corte. MC1: momento de corte 1; MC2: momento de corte 2; MC3: momento de corte 3. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre MC.

En la figura 1 se observa la respuesta en el contenido de LDA (%), de acuerdo al híbrido y el momento de corte. Ambos tratamientos presentaron interacción significativa entre sí, por lo que debemos analizar el efecto del momento de corte según el híbrido:

- ADV 2900: Ninguno de los tres MC presentó diferencias significativas. En los híbridos con el rasgo BMR, el aumento en el contenido de LDA (%) a medida que avanza la madurez es menor comparada con híbridos no BMR.
- Green Feed: Los MC3 y MC1 presentaron los mayores contenidos de LDA (%), sin diferencias significativas entre sí.
- TOB 80 Sil y Sugar Graze: En ambos, el MC3 presentó el mayor contenido de LDA (%), lo que indicaría un incremento en el contenido de la misma a medida que el cultivo se aproxima a su madurez. El contenido de lignina se incrementa en las paredes de células especializadas y tejidos que han cesado su crecimiento.

A continuación se detallaran los resultados de cada material, promediando los efectos de momento de corte y dosis nitrogenada, existiendo interacción H×MC.

Contenido de LDA (%) de los híbridos. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05):

1. Green Feed - 5,17% a
2. TOB 80 Sil - 3,79% b
3. Sugar Graze - 3,65% bc
4. ADV 2900 - 2.96% c

ADV 2900, fue el mejor posicionado en cuanto a que presentó un menor contenido de LDA. Esta respuesta puede explicarse a través de su rasgo BMR (brown mid rib, nervadura central marrón, que permite una reducción del componente lignina en la estructura vegetativa.

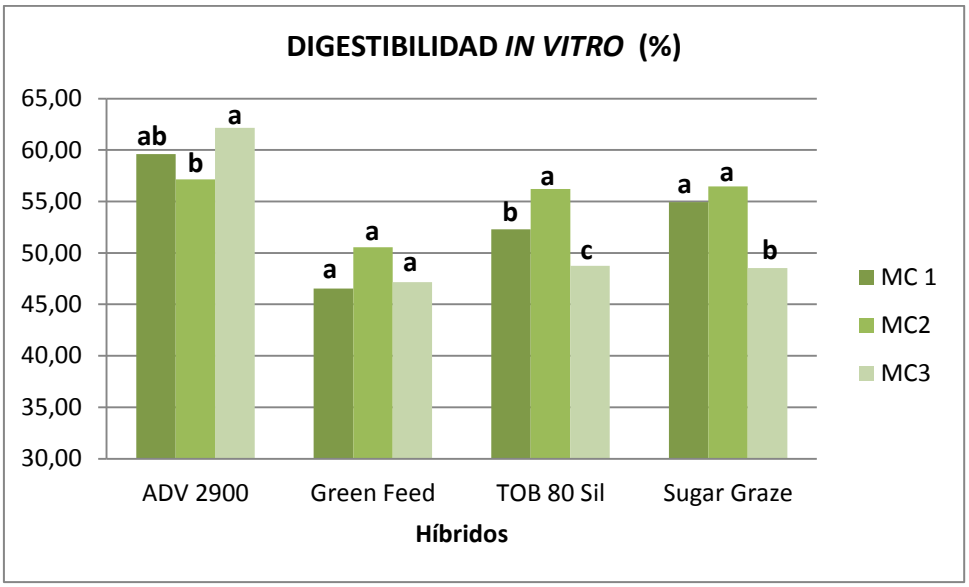

Figura 2: digestibilidad *in vitro* (%) para cada híbrido y momento de corte. MC1: momento de corte 1; MC2: momento de corte 2; MC3: momento de corte 3. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre MC.

En la figura 2 se pueden observar los resultados de digestibilidad *in vitro* (%), de acuerdo el híbrido y el MC. Al igual que para el anterior parámetro, ambos tratamientos presentaron interacción significativa entre sí, por lo que debemos analizar el efecto del MC para cada híbrido por separado:

- ADV 2900: el MC3 obtuvo los mayores valores de digestibilidad (mayor al 60%), mientras que el MC2 el valor más bajo. El MC1 no difirió significativamente (p<=0,05) de los otros dos MC. Esta respuesta no se corresponde con la variación en el contenido de LDA (figura 1), principal factor a considerar.
- Green Feed: No se observan diferencias significativas (p<=0,05). Esto nos indica que este híbrido es capaz de mantener los valores de digestibilidad a medida que el cultivo va madurando.
- TOB 80 Sil y Sugar Graze: En ambos, el MC 3 presentó los valores más bajos de digestibilidad, respuesta que puede ser entendida si repasamos los elevados contenidos de LDA registrados para dicho MC.

Digestibilidad in vitro (%) de los híbridos sin discriminar por MC ni N:

1. ADV 2900 - 59,91% a
2. Sugar Graze - 53,32% b
3. TOB 80 Sil - 52,41% b
4. Green Feed - 48,09% c

Se puede inferir la causa de los resultados obtenidos para cada híbrido, al repasar el contenido de LDA de los mismos. La lignina es casi indigestible y además inhibe la digestión de otros constituyentes orgánicos, por lo que es el principal factor que influye sobre los valores de digestibilidad *in vitro* recién mencionados. ADV 2900, fue el mejor posicionado ya que posee el rasgo BMR.

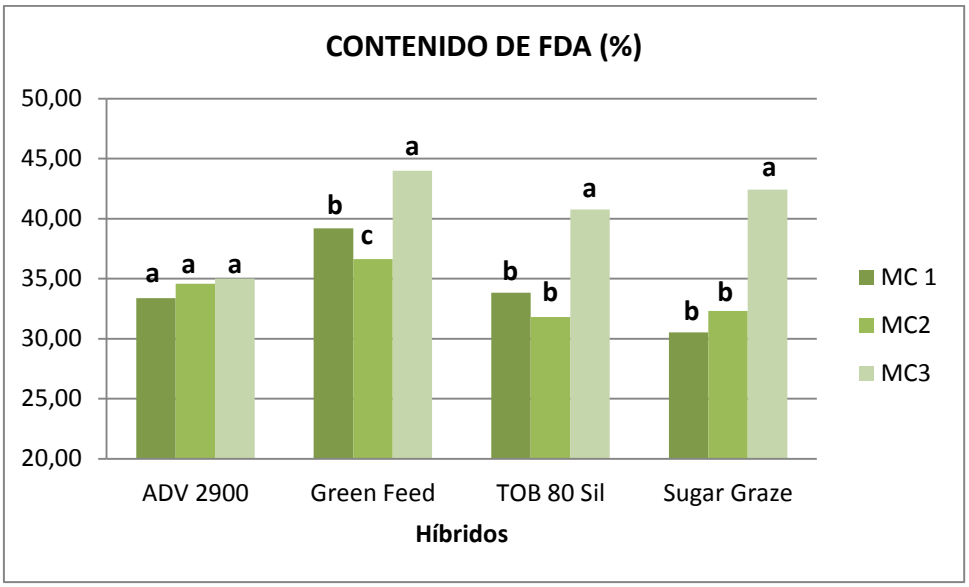

Figura 3: Contenido de FDA (%) para cada híbrido y momento de corte. MC1: momento de corte 1; MC2: momento de corte 2; MC3: momento de corte 3. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre MC.

En el análisis del contenido de FDA (Figura 3), al igual que para digestibilidad u otros parámetros de calidad similares, presenta una interacción significativa (p<=0,05) H×MC.

Recordar que el parámetro FDA se compone de la suma de celulosa y lignina (LDA). Como esta última se presenta en una proporción bastante menor, cualquier variación importante del contenido de FDA (%), permite suponer variaciones en el contenido de celulosa.

En grandes rasgos, el efecto registrado del MC sobre el contenido de FDA (%) para cada híbrido, es muy similar al observado para LDA (%) (Figura 1). Esto indicaría que la respuesta del contenido de celulosa al MC, es similar al de la lignina.

- ADV 2900: No se evidenciaron diferencias significativas (p<=0,05) entro los tres MC.

- Green Feed, TOB 80 Sil y Sugar Graze: En los 3 híbridos, el máximo contenido de FDA (%) se alcanza con el MC3, lo que se traduce en un aumento del contenido de celulosa hacia la madurez.

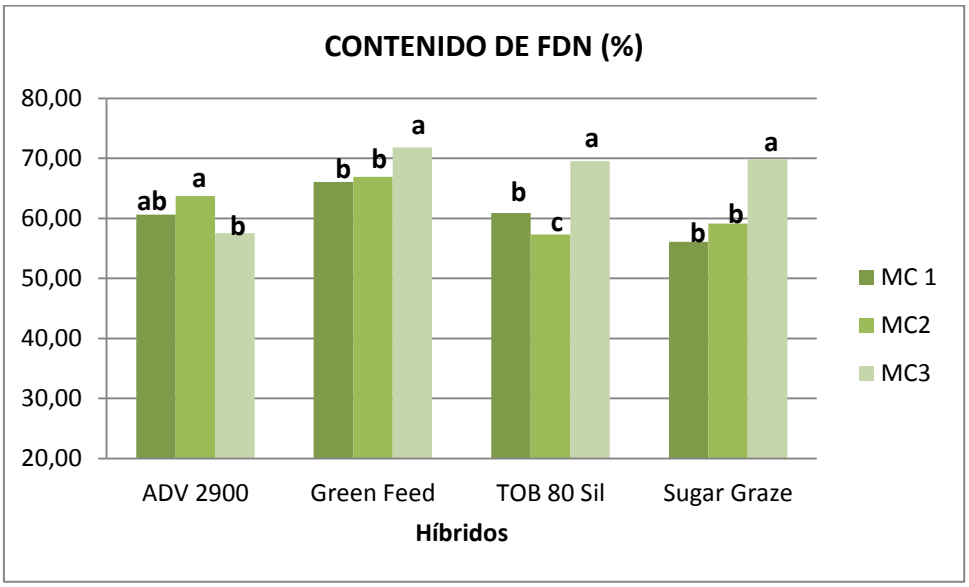

Figura 4: Contenido de FDN (%) para cada híbrido y momento de corte. MC1: momento de corte 1; MC2: momento de corte 2; MC3: momento de corte 3. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre MC.

Al analizar la figura 4, debemos tener presente que el parámetro FDN se compone de celulosa, hemicelulosa (en una proporción levemente menor a la celulosa) y lignina (en una proporción bastante menor). Teniendo presente lo anterior y también el efecto del MC sobre el contenido de celulosa (analizado en la figura 3) y de lignina (figura 1), podemos interpretar la presente figura de la siguiente manera:

- ADV 2900: el valor de FDN (%) registrado en el MC3, es significativamente (p<=0,05) menor al MC2. Esto se traduce en un descenso en la participación de hemicelulosa.
- Green Feed, TOB 80 Sil y Sugar Graze: Si bien en los 3 híbridos el máximo contenido de FDN (%) se alcanza con el MC3, la magnitud de

la diferencia es igual o menor a la registrada para FDA. Esto nos lleva a inferir que el contenido de hemicelulosa (%) se mantuvo o descendió con los cortes más tardíos.

B. Rendimiento de la biomasa lignocelulósica

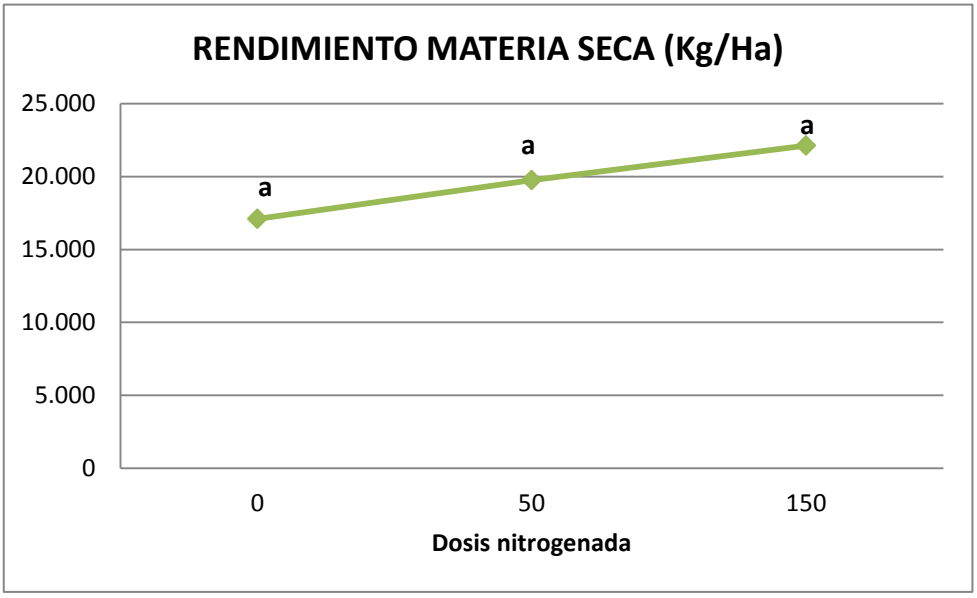

Figura 5: Rendimiento de materia seca (kg/ha) en función de la dosis nitrogenada (kg Urea/ha). Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

La figura 5 muestra que no hubo diferencias significativas (p<=0,05) para los diferentes niveles de fertilización N, pero si se destaca una tendencia a un aumento en el rendimiento de biomasa de planta entera ante el incremento de la dosis de N. La escasa acción del N, posiblemente se manifestó en un aumento del área foliar y el contenido de clorofila en hojas, mejorando la actividad fotosintética del cultivo, lo que se refleja en la producción de biomasa. Se puede inferir que el principal causante de la escasa respuesta al agregado de N, fue la elevada disponibilidad inicial del mismo en el suelo. También existe la posibilidad de problemas ambientales que hayan afectado la incorporación del fertilizante.

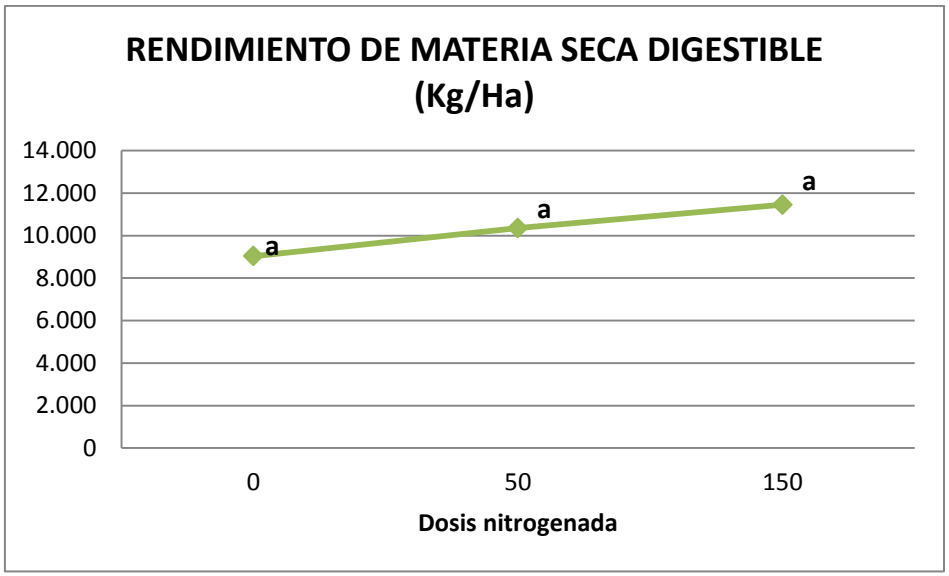

Figura 6: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) en función de la dosis nitrogenada (kg urea/ha). Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

El rendimiento de materia seca digestible (RMSD), en respuesta a la fertilización N (figura 6) presenta un comportamiento similar al analizado para RMS, o sea una tendencia al aumento del rendimiento ante incrementos en la dosis nitrogenada.

El parámetro RMSD es función del RMS por la digestibilidad. Al analizar el efecto del N sobre la digestibilidad, no se observaron diferencias significativas (p<=0,05). Por lo tanto, la variación del RMSD dependió únicamente del RMS.

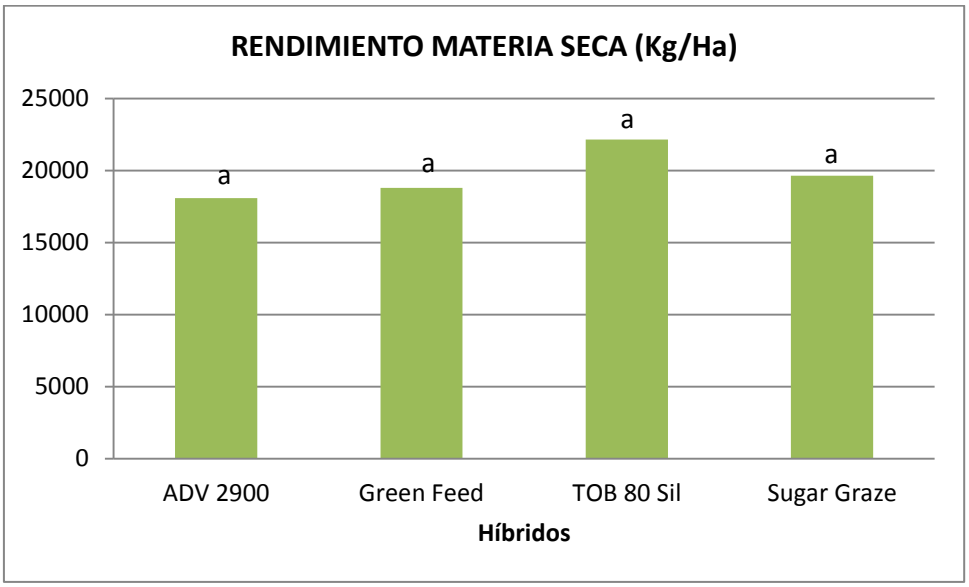

Figura 7: Rendimiento de materia seca (kg/ha) para cada material. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre Materiales.

En la figura 7, se aprecia que ninguno de los híbridos ensayados presentó diferencias significativas (p<=0,05) para el el RMS (kg/ha). Pero si se puede observar una leve ventaja numérica del híbrido TOB 80 Sil, con respecto al resto.

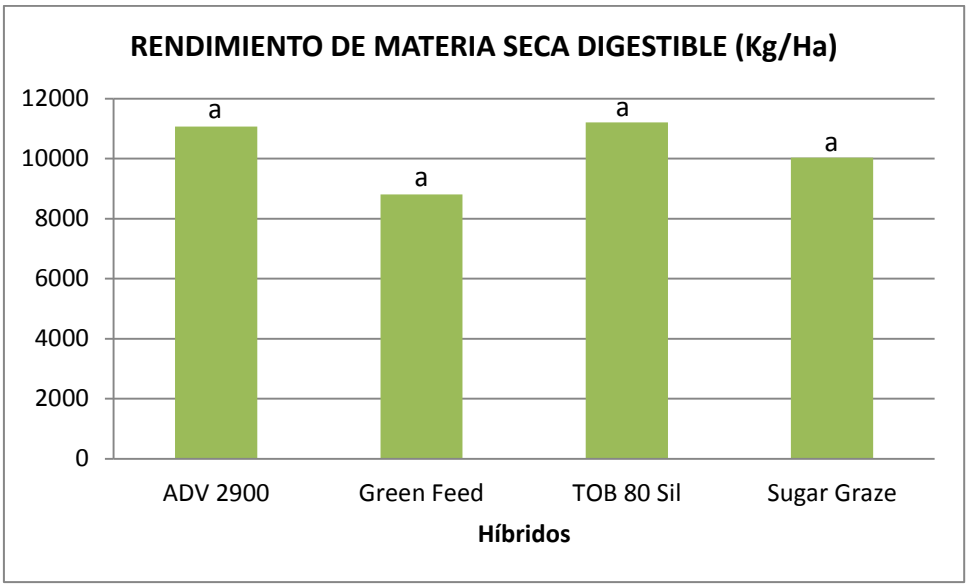

Figura 8: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) para cada material. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre Materiales.

En la figura 8, se muestra graficado el RMSD (kg/ha) de los híbridos. Ninguno de los mismos presentó diferencias significativas (p<=0,05), promediando un RMSD de 10280 kg/ha.

El RMSD es un parámetro compuesto, siendo función del RMS y de la digestibilidad. En este sentido el híbrido ADV 2900 pudo equiparar al híbrido TOB 80 Sil debido a su elevada digestibilidad.

La ausencia de una mayor diferencia entre los híbridos se debe al similar RMS.

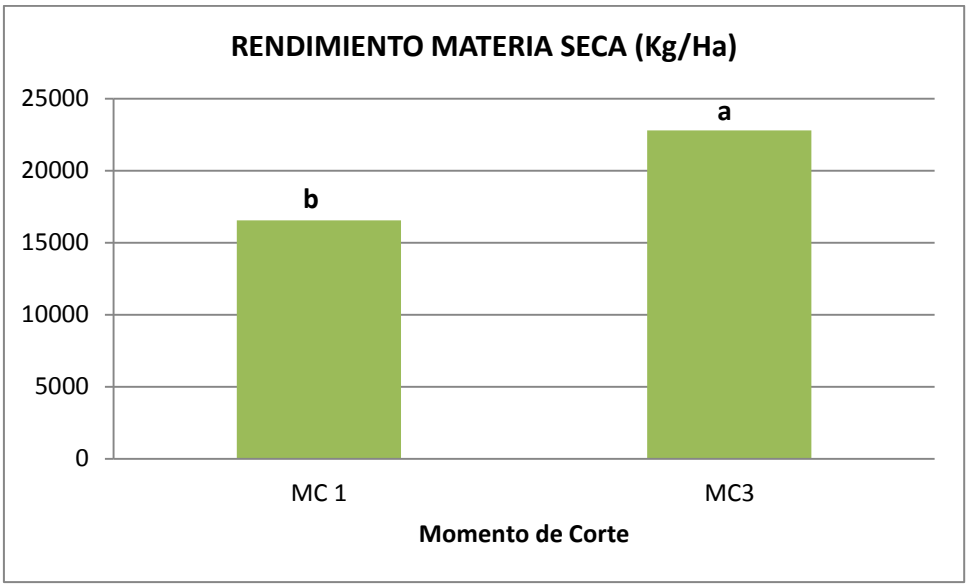

Figura 9: Rendimiento de materia seca (kg/ha) para cada MC. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05) entre MC.

La respuesta del RMS para cada MC (Figura 9), no presenta interacción con otros tratamientos. De esta manera, los resultados emergentes del MC sobre el RMS pueden extrapolarse a cualquiera de los híbridos o dosis N utilizados.

En la figura observamos como el RMS se incrementa en un 38% en el MC3 (22787 kg/ha) con respecto al MC1 (16538 kg/ha).

Por lo tanto, la máxima producción de MS se logra en la fecha más tardía. Es que al retrasar el MC, se le permitió al cultivo prolongar el tiempo realizando fotosíntesis, acumulando más biomasa.

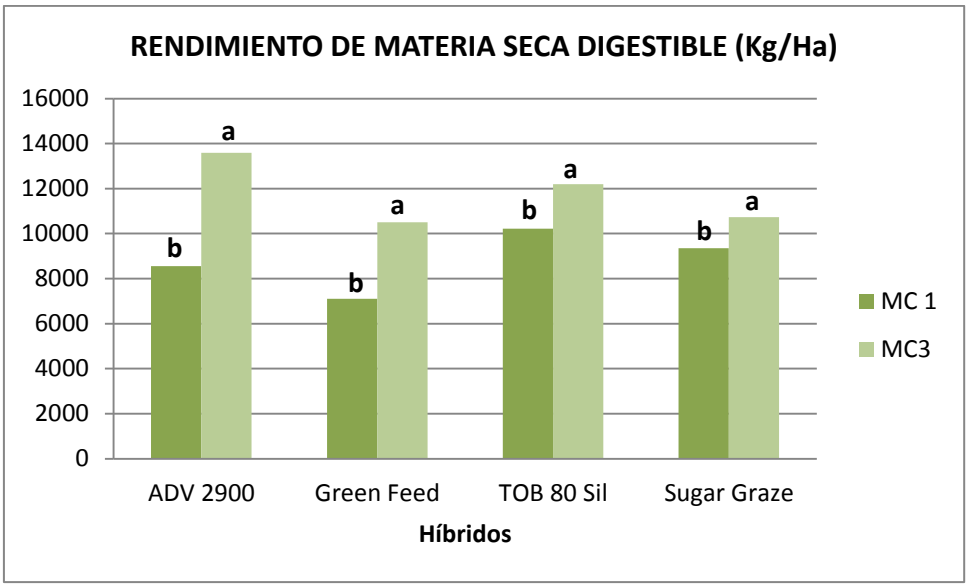

Figura 10: Rendimiento de materia seca digestible (kg/ha) para cada híbrido y momento de corte. MC1: momento de corte 1; MC3: momento de corte 3.

El análisis de la respuesta del RMSD para cada MC, se opta por discriminarlo según el híbrido (Figura 10), a pesar de no haberse registrado interacción significativa ($p<=0,05$) entre ambos tratamientos. Esta forma de análisis permite comprender el efecto diferencial de la digestibilidad (componente del RMSD) según cada híbrido.

Para todos los híbridos, el efecto del MC difirió significativamente en el mismo sentido, superando el MC 3 al MC1 (si promediamos todos los materiales, se incrementó el RMSD un 33%).

Pero a diferencia del RMS (ver figura 9), la magnitud del incremento difiere significativamente según el híbrido en cuestión. La causa se debe al diferente efecto del MC sobre la digestibilidad según el híbrido. En el híbrido ADV 2900, el aumento del RMSD fue el de mayor magnitud, ya que en el MC 3 coincidía con un mayor RMS y una mayor digestibilidad. Mientras que para híbridos como TOB 80 Sil ó Sugar Graze, el aumento del RMS en el MC 3, fue compensado con una menor digestibilidad en dicho corte, haciendo que el incremento del RMSD no sea tan importante.

C. Rendimiento de la biomasa azucarada

En los análisis del contenido de °Brix, no se ha registrado en ningún caso interacción entre tratamientos.

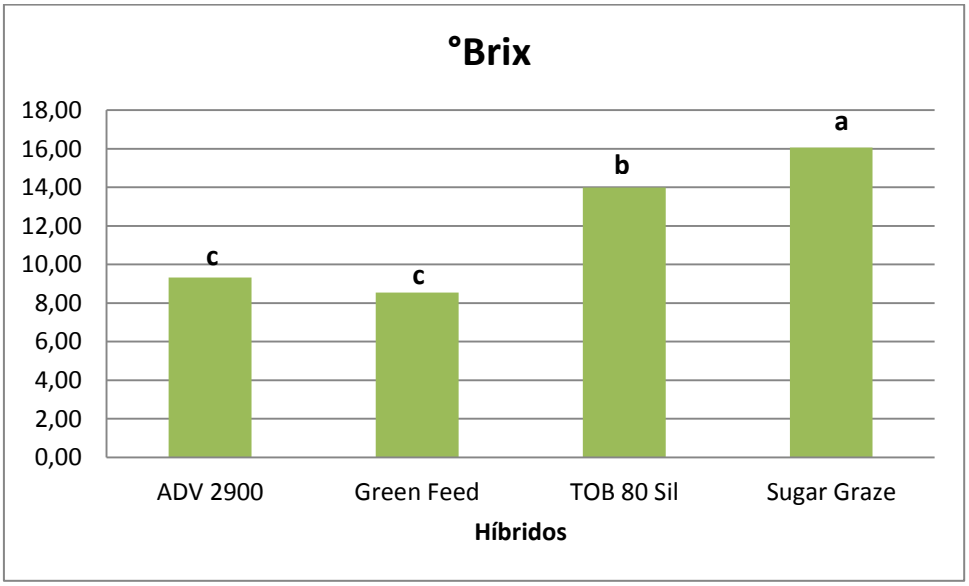

Figura 11: Contenido de °brix en función del material y promediado entre dosis de nitrógeno y momentos de corte. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

Al analizar el contenido de °Brix en función del híbrido (Figura 11), se observaron diferencias significativas.

El híbrido Sugar Graze prevaleció muy por encima del resto, alcanzando valores que fácilmente lo pueden definir como un sorgo dulce. Este híbrido, a diferencia de los otros, es el resultado de un programa de mejoramiento genético, el cual se focalizó especialmente en el contenido de azúcares. Esto lo transforma en un híbrido a tener en cuenta para aquellos propósitos donde el contenido de azúcares cobra relevancia.

El híbrido TOB 80 Sil, aun sin haber alcanzado al Sugar Graze, también se destacó con valores elevados. Si bien no alcanza los valores de °Brix

suficientes para categorizarlo como “sorgo dulce”, es importante señalar que por ser un biotipo con alto contenido de granos, el contenido de azucares logrado es destacable.

Los dos restantes híbridos presentaron valores de °Brix bastante más bajos.

En cuanto al tratamiento de fertilización N, no se produjeron efectos de significancia sobre el contenido de °Brix, ni tampoco se observó tendencia alguna.

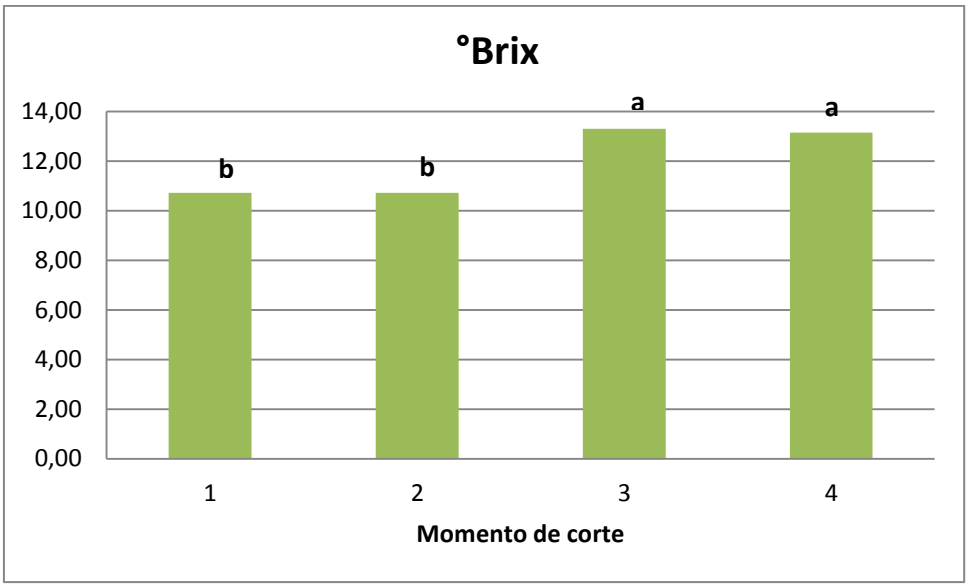

Figura 12: Contenido de °brix en función del momento de corte, promediado entre híbridos y dosis de nitrógeno. Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0,05).

El tratamiento MC presentó diferencias significativas. Las dos instancias de corte más tardías, tuvieron los valores más altos de °Brix.

Estos resultados evidencian en primera instancia, una variación en el contenido de azúcares al madurar el cultivo. La concentración alcanzaría su máximo a partir del estadío correspondiente al MC3, manteniéndose en el MC4.

DISCUSION

Respuesta de la calidad de la biomasa lignocelulósica ante distintas dosis nitrogenada: Nuestros resultados no coinciden con los reportados por Torrecillas y Bertoia (2008), quienes encontraron un efecto positivo del N sobre la digestibilidad y negativo sobre el contenido de LDA. Disparidad que posiblemente se sustente en la disponibilidad inicial de nitratos en el suelo del presente trabajo, no permitiendo a la fertilización N ejercer efecto alguno.

Respuesta de la calidad de la biomasa lignocelulósica según el híbrido: Los resultados obtenidos concuerdan a la información aportada por autores como Boudet (1998) o (Torrecillas, 2006), quienes destacan la importancia del rasgo BMR sobre la calidad de la fracción tallo más hojas.

Respuesta de la calidad de la biomasa lignocelulósica según el momento de corte: Exceptuando al híbrido BMR (ADV 2900), el resto respondió en forma coincidente a lo registrado por Torrecillas (2006), quien destaca la mayor digestibilidad y los menores valores de LDA, FDA y FDN a cortes tempranos.

Respuesta del rendimiento de la biomasa lignocelulósica ante distintas dosis nitrogenada: El efecto registrado del N en dicho parámetro, no coincide con los citados por los autores mencionados anteriormente. Aunque se justifica la escasa respuesta de la fertilización N, en que debido a las condiciones iniciales del ensayo, no tuvo la oportunidad de ejercer una significativa influencia. Aun así se logró manifestar una tendencia a un aumento en la

producción de biomasa con mayores dosis de N, respuesta esperada según Zhao et al. (2005).

Respuesta del rendimiento de la biomasa lignocelulósica según el momento de corte: El incremento del RMS en el MC 3, respecto al MC 1, concuerda con los resultados aportados por Romero et al. (1998). La máxima producción de MS se lograría entonces en las fecha más tardía.

Rendimiento de la biomasa azucarada ante distintas según el híbrido: El comparativo de rendimiento en contenido de azucares entre los híbridos estudiados, ubicó a Sugar Graze por encima del resto. Esta respuesta concuerda con lo establecido por diversos autores que describen a los denominados “sorgos dulces”, como los híbridos con mayores contenidos de azúcares en tallos.

Rendimiento de la biomasa azucarada ante distintas dosis nitrogenada: Los resultados registrados en el presente trabajo son coincidentes a los obtenidos por Martinez et al. (2012), ya que en ambos la dosis de N no manifestó efecto significativo alguno en dicho parámetro. Mientras que Almodares *et al.* (2009), indicaba un efecto negativo de la dosis N sobre el contenido de azúcares.

Rendimiento de la biomasa azucarada según el momento de corte: Concuerda con Wall y Ross (1975) en cuanto a que durante el desarrollo de la planta de sorgo el contenido en azúcares presenta variaciones. En cuanto al

sentido de dicha variación, al igual que lo indicado por la FAO (2004), el estadío de mayor contenido de azúcares son los cercanos a la madurez fisiológica (para materiales no fotosensitivos).

CONCLUSION

A. Influencia de ciertas prácticas agronómicas sobre la biomasa lignocelulósica:

1. No existieron diferencias significativas en la cantidad de la biomasa lignocelulósica (RMS) producida por los distintos materiales utilizados.

   En cuanto a la calidad de la biomasa, destacamos aquellos híbridos con el rasgo BMR, que presentaron un menor contenido de LDA (%) y mayor digestibilidad (%). Estos híbridos BMR presentarían entonces una mayor aptitud para la producción de bioetanol a partir de su biomasa lignocelulósica, debido a que la lignina interacciona con los demás polisacáridos aumentando la resistencia de los tejidos a la acción de enzimas hidrolíticas.
2. No se observó respuesta de la producción de biomasa lignocelulósica ante las distintas dosis N ensayadas, ni en términos de cantidad como de calidad.
3. El MC presentó un efecto marcado en la producción de biomasa lignocelulósica. Ante cortes más tardíos la calidad de la biomasa disminuyó (mayor LDA y menos digestibilidad), exceptuando al híbrido BMR quien mantuvo la calidad en el tiempo evaluado. Los valores de LDA (%) se mostraron relacionados positivamente con la madurez.

En cuanto al RMSD, en los cortes más tardíos se obtuvieron los valores más elevados, gracias a la mayor acumulación de materia seca, a pesar de haber presentado valores de digestibilidad bajos.

B. Influencia de ciertas prácticas agronómicas sobre la biomasa azucarada:

1. Se registraron diferencias en el patrón de concentración de azúcares solubles según el híbrido considerado. Destacamos al híbrido Sugar Graze, que presentó elevados valores de °Brix en el tallo. Lo anterior confirma su potencial utilización para la producción de bioetanol a partir de su biomasa azucarada.
2. Bajo las condiciones en que se desarrolló el presente trabajo de investigación, la modificación en los niveles de nutrición N no presentó influencia significativa alguna sobre la acumulación de azúcares solubles (°Brix) en el tallo.
3. Se produjeron diferencias en el patrón de concentración de azúcares solubles (°Brix) según el MC. Retrasando el momento de corte se logró una mayor acumulación de azúcares solubles en el tallo.

Para finalizar, destacamos la viabilidad de algunos híbridos de sorgo como fuente productora potencial de bioetanol, realizando una correcta combinación de los distintos factores de manejo, como momento de corte y fertilización nitrogenada.

El cultivo de sorgo estaría en condiciones de complementar exitosamente a la caña de azúcar dentro de la zona típicamente azucarera.

BIBLIOGRAFIA

Blanco M.I. y Azqueta D. (2008): "Can the environmental benefits of biomass support agriculture?" The case of cereals for electricity and bioethanol production in Northern Spain. Energy Policy 36, 357-366.

Blumenthal, J.B., Rooney, W.L, and D. Wang. (2007): "Yield and ethanol production in sorghum genotypes." Agron Abstract [CD-ROM]. ASA, Madison, Wisconsin.

Bothast R.J. y Schlicher M.A. (2005): Biotechnological process for conversion of corn into ethanol. Applied Biochemistry and Biotechnology 67, 19-25.

Boudet, A.M. (1998): A new view of lignification. Trends Plant Sci. 3 : 67-71.

Cayón, D. (2013): "Automotrices a favor de duplicar el-contenido de bioetanol en la nafta", http://www.cader.org.ar/noticias-y-novedades/automotrices-a-favor-de-duplicar-el-contenido-de-bioetanol-en-la-nafta.htm (consultado el 6 de noviembre de 2013)

Devantier R., Pedersen S., Olsson L. (2005): Characterization of very high gravity ethanol fermentation of corn mash. Effect of glucoamylase dosage, pre-saccharification and yeast strain. Applied Biochemistry and Biotechnology 68, 622-629.

Dien, B.S., Jung, H.J.G., Vogel, K.P., Casler, M.D., Lamb, J.F.S., Iten, L., Mitchell, R.B. and G. Sarath. (2006): Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzimatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass. Biomass & Bioenergy 30:880-891.

Doggett, H. (1988): Sorghum. 2nd edn. London: Longman; published by Wiley, New York.

FAO, (2004): Ethanol production from sweet sorghum. En línea disponible en: http://www.fao.org/docrep/t4470e/t4470e07.htm#4.1.%20components%20of%20sweet%20sorghum%20stem%20juice. (Consultado el 20/02/2014)

Fontanetto, H. y O. Keller. (2003): Fertilización en Sorgo. Revista Agromercado. Publicación de Negocios de Campo SRL. Año 23. Número 79. Oct. 2003. pp.12-16.

Garro O., E. Rodríguez, R. Palacios Unda and D.A. Callieri. (1995): Mathematical Modelling of the Alcoholic Fermentation of Glucose by Zymomonas mobilis mobilis. J. Chem. Tech. Biotechnol. 63:367-373

Gómez L.D., Steele-King, C.G., Mc Queen-Mason S.J. (2008): Sustainable liquid biofuels from biomass: The writing's on the walls. New Phytologist 178, 473-485.

Grabber, J.H. (2005): How do lignin composition, structure, and cross-linking affect degradability? A review of cell wall model studies. Crop Sci. 45:820–831.

Graham, R.L., Nelson R., Sheehan J., Perlack R.D. and L.L. Wright. (2007): Current and potential U.S. corn stover supplies. Agron. Journal 99:1-11.

Gutiérrez J. V., García J. C., García F. y Valle Rodríguez L. L. (2011): "Producción de biomasa y concentración de azúcares de dos variedades de sorgo dulce en la región Huasteca Tamaulipeca". http://www.bioline.org.br/request?cg11006 (consultado el 25/02/2013)

Han, W.B. and Kim, D.A. (1992): Effect of seeding rate and nitrogen fertilization on the carbohydrate reserves, stand reduction, and yield of sorghum-sudangrass hybrid. J. Korean Sco. Grassi. Sci. 12: 33-40

Holland, J.F., Daniells, I.G., Young, R R. and A.L. Bernardi. (1996): Relationship between yield of grain sorghum and soil salinity under field conditions. In: Proc. 8th Australian Agronomy Conference, 10 pp. Toowoomba, Australia.

Intelligent Energy Europe (2012): "Difusión de un modelo sostenible en la UE para producir etanol de 1° generación a partir de sorgo dulce en plantas descentralizadas" Manual para las Asociaciones Agrícolas. http://esse-

community.eu/wp-content/uploads/2012/08/Manual_for_trainers_esp.pdf (Consultado el 11/02/2014)

Johnson, R.C. and N.C. Turner. (1978): Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits. Plant Physiol. 61: 122-126.

Jung, H.G. and M.D. Casler. (2006): Maize stem tissues: Cell wall concentration and composition during development. Crop Sci. 46:1793–1800.

Kim S. y Dale B.E. (2004): Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy* **26**, 361-375.

Laopaiboon L., Thanonkeo P., Jaisil P., Laopaiboon P. (2007): Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by Saccharomyces cerevisiae. World Journal of Microbiology and Biotechnology 23, 1497-1501.

Limtong S., Sringiew C., Yongmanitchai W. (2007): Production of fuel ethanol at high temperature from sugar cane juice by a newly isolated Kluyveromyces marxianus. Bioresource Technology 98, 3367-3374.

Mamma, D., Koullas, D., Fountoukidis, G., Kekos, D., Macris, B.J. y Koukios, E. (1996): Bioethanol from sweet sorghum: simultaneous saccharification and fermentation of carbohydrates by a mixed microbial culture. *Process Biochemistry 31,* 377–381.

Martinez J., Villegas Y., Carrillo J., Espinosa H. (2012): "Efecto de prácticas agronómicas en la producción de biomasa de sorgo dulce (Sorghum bicolor L.)" Naturaleza Y Desarrollo, 10, 14 – 26. México, 2012.

Maunder, B. (2002): Sorghum, the global grain of the future. 3p. http//www. Sorghumgrowers.com.

Miralles De Imperial R., Rodríguez C., Calvo R., Delgado m. (2011): "La aplicación de gallinazas en sorgo forrajero como cultivo energético" *INIA. Departamento de Medio Ambiente. Ctra. de La Coruña*, *Madrid, España.*

Muchow, R.C. (1998): Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. Field Crops Res. 56: 2009-216

OCEBA. (2007): El etanol ¿La energía del futuro?. Ministerio de Infraestructura Vivienda y Servicios Públicos. Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. http://www.oceba.gba.gov.ar/prensa/modules.php?name=News&file=print&sid=11643 (verificado el 14 de Julio de 2008).

Oikeh, S.O., Chude, V.O., Kling, G.J. and Horst, W.J. (2007): Comparative producivity of nitrogen-use efficient and nitrogen-inefficient maize cultivar and tradicional grain sorghum in the moist Savanna of West Africa. African J. Agric. Res. 2:112-118

Osafo, E.L., Owen, E., Said, A.N., Gill, M. and J. Sherington. (1994): The effect of variety and amount offered of chopped sorghum stover on the performance of sheep. In: Small Ruminant Research in Africa. Proceedings of the third Biennial Conference of the Small Ruminant Research. Lebbie, S. And E. Kagwini, (eds.), 25 pp. Kampala, Uganda.

Pedersen, J.F., Vogel, K.P. and D.L. Funnell. (2005): Impact of Reduced Lignin on Plant Fitness. Crop Sci. 45:812–819.

Pejó, E. T. (2010): "Bioetanol de paja de trigo: estrategias de integración de las etapas del proceso", Memoria para optar al Grado de Doctor, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid, España, Madrid.

Rafele, E. (2013): "Estiman que la producción de bioetanol crecerá 30% este año", http://elinversoronline.com/2013/01/estiman-que-la-produccion-de-bioetanol-crecera-30-este-ano/ (consultado el 6 de noviembre de 2013)

Rattunde, H.F.W., Zerbini, E., Chandra, S. and D.J. Flower. (2001): Stover quality of dual-purpose sorghums: genetic and environmental sources of variation. Field Crops Res. 71: 1-8.

Reddy, B.V.S., Ramesh, S., Sanjana Reddy, P., Ramaiah, B., Salimath, P.M. and R. Rajashekar Kachapur. (2005): Sweet sorghum - A potential alternative raw material for bioethanol and bio-energy. International Sorghum and Millets Newsletter 46:79–86.

Romero L., Bruno O., Comerón E., Gaggiotti M. (1998): "Efecto del momento de corte sobre la producción y la calidad de un sorgo forrajero azucarado para silaje" Información Técnica para Productores 1997-1998, Publicación Miscelánea Nro 89. http://rafaela.inta.gov.ar/productores97_98/p34.htm (consultado el 06 de Marzo de 2014)

Salih, A.A., Ali, I.A., Lux, A., Luxova, M., Cohen, Y., Sugimoto, Y. and S. Inanaga. (1999): Rooting, water uptake, and xylem structure adaptation to drought of two sorghum cultivars. Crop Sci. 39: 168-173.

Sánchez O.J. y Cardona C.A. (2008): Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. Bioresource Technology 99, 5270-5295.

Seetharama, N., Dayakar Rao, B., Ratnavathi, C.V., Shahid Parwez, M., Binu, M., Singh, K. and B. Singh. (2002): Sweet sorghum - an ancillary sugar crop. Indian Farming 36(4):7–8.

Singh, V., Singh, A.K., Verma, S.S., (1988): Effect of nitrogen fertilization on yield and quality of multicut tropical forages. Trop. Agric. 65: 129-131

Sumner, D. C., Martin, W.E. and Etchegaray, H.S. (1965): Dry matter and protein yields and nitrate content of Piper sudangrass (Sorghum Sudanense Stapf.) in response to nitrogen fertilization. Agron. J. 57: 351-354

Thomas, H. and C. Howarth. (2000): Five ways to stay green. Journal of Experimental Botany 51: 329-337.

Torrecillas M. G. (2005): "El Cultivo de Sorgo como Alternativa para Ensilaje", Resumen de la disertación del Congreso de Mercoláctea 2006, Argentina.

Torrecillas, M.G. y Bertotia, L.M. (2008): Acumulación y calidad de forraje de híbridos de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) con diferentes niveles de fertilización nitrogenada. Revista Argentina de Producción Animal. Vol 28 (3): 201-207

Torrecillas, M.G., Bertoia, L.M. y Cantamutto, M.A (2004): "rendimiento y calidad de sorgo granífero para silaje en diferentes estados de madurez" Congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal (AAPA), Buenos Aires, 2004

Van Soest, P.J. (1965): Non nutritive residues: A system of analysis for the replacement of crude fibre. Proc. Annu. Meet. Assoc. Off. Agric. Chem. 79: 546-551.

Vogel, K., Pedersen, J, Masterson, S. and J. Toy. (1999): Evaluation of a filter bag system for NDF, and IVDMD forage analysis. Crop Sci. 39: 276-279.

Wall J.S. y Ross W.M. (1975): Producción y usos del sorgo. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 399 p.

Wang S., Thomas K.C., Sosulski K., Ingledew W.M., Sosulski F.W. (1999): Grain pearling and very high gravity (VHG) fermentation technologies for fuel alcohol production from rye and triticale. Process Biochemistry 34, 421-428.

Wyman C.E. (1999): Biomass ethanol: Technical progress, opportunities, andcommercial challenges. *Annual Review of Energy and the Environment* **24**, 189-226.

Wyman C.E., Dale B.E., Elander R.T., Holtzapple M., Ladisch M.R., Lee Y.Y. (2005): Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. Bioresource Technology 96, 1959-1966.

Zhao, D., K. R. Reddy, V. G. Kakani y V. R. Reddy. (2005): "Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum." European J. Agron. 22, 391-403

Zhan X., Wang D., Tuinstra M.R., Bean S., Seib P.A., Sun X.S. (2003): Ethanol and lactic acid production as affected by sorghum genotype and location. Industrial Crops and Products 18, 245-255.

ANEXOS

Tabla V. Contenido de sacarosa del jugo extraído en el momento de corte 4.

Tratamiento		**Sacarosa (gr/100ml)**
Dosis N	**Híbrido**	
0	ADV 2900	-
0	TOB 80 Sil	12.03
0	Sugar Graze	11.57
50	ADV 2900	12.34
50	TOB 80 Sil	10.00
50	Sugar Graze	12.11
150	ADV 2900	-
150	TOB 80 Sil	-
150	Sugar Graze	12.03

En el tabla V se expone a modo de estudio exploratorio, los resultados de los análisis de las muestras del jugo extraído en el MC 4, a los cuales se lo sometieron al método de Fehling, con el propósito de avanzar en lo referente a calidad de azucares. No se los sometió a un análisis estadístico debido a la escasez de datos recopilados.

Solamente podemos mencionar en que para el híbrido Sugar Graze, no se evidencia efecto alguno de la fertilización N.