

Potencialidad del sorgo dulce como biocombustible en el Uruguay¹

Guillermo Siri-Prieto*, Luis Terzagui**, Hamilton Ribero**, David Gandolfo**, Juan Mosqueira**

ESCENARIO ENERGÉTICO MUNDIAL

Hoy en día en el mundo se está viviendo la problemática general del agotamiento progresivo de los recursos energéticos basados mayoritariamente en combustibles no renovables (principalmente petróleo). Para agravar esta situación, el consumo mundial de energía sigue aumentando a un ritmo cada vez más creciente, explicado principalmente por el crecimiento de China e India. La demanda actual es de aproximadamente 90 millones de barriles/día (39% de la demanda global por fuentes de energía primaria) y se prevé que el consumo aumentará a 118 millones de barriles/día en 2030.

La incertidumbre que genera la dependencia directa que las naciones tienen de suministro continuo de petróleo y la escalada reciente de su precio (Barril US\$ 138 a junio de 2008, referencia Texas) hace que el tema energético sea una prioridad para todos los países. En adición a esto, se continúa acentuando la contaminación generada por la liberación a la atmósfera de enormes cantidades de gases contaminantes. Esto ha contribuido a los cambios climáticos y, de algún tiempo a esta parte, se ha convertido en uno de los grandes problemas de los gobiernos y de la opinión pública en general.

Se señala que agregar un 10% de etanol al combustible reduciría hasta en un 30% las emisiones de monóxido de carbono (CO) y entre 6-10% las de dióxido de carbono (CO₂). Toda esta situación ha generado que en los últimos tiempos esté creciendo el interés de las principales economías del mundo en la investigación, producción y utilización de recursos energéticos renovables, como es el etanol, como fuente alternativa de combustible.

ESCENARIO ENERGÉTICO NACIONAL

Históricamente nuestro país ha presentado una alta dependencia de los combustibles derivados del petróleo. Éstos se están caracterizando, como fuera mencionado anteriormente, por precios altos con tendencias al alza, aumentando dramáticamente su incidencia en los costos de producción. Si bien no es posible pensar en una sustitución radical de los derivados del petróleo, disponemos sí de los recursos naturales para la producción de bioenergía y con ello reducir estos efectos.

¹ Trabajo financiado parcialmente por ANCAP en el marco del convenio UR-ANCAP y por el Programa de Desarrollo Tecnológico del DICyT.

*Ing. Agr. Dpto. Producción Vegetal. EEMAC.

**Ayudantes de Investigación, Dpto. Producción Vegetal. EEMAC.



Vista parcial del sorgo dulce zafra 2005 - 2006.

¿QUÉ SON LOS BIOCOMBUSTIBLES?

Se denomina así a aquellos combustibles de origen biológico y que son renovables a partir de los restos orgánicos de donde proceden. Los dos productos más desarrollados y empleados como biocombustibles son el bioetanol y el biodiesel.

El bioetanol es un etanol producido a partir de la fermentación de los azúcares. Las materias primas pueden producir directamente azúcares simples, como la caña de azúcar, sorgo dulce, etc. o se puede obtener etanol a partir de granos (maíz, trigo, etc.) que contienen almidón a través de procesos de sacarificación mediante hidrólisis. El biodiesel se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales (colza, palma, girasol, ricino, etc.) o grasas animales, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación.

Existen muchos enfoques sobre la conveniencia o no de los biocombustibles a nivel mundial. Estas son algunas de las características que poseen a favor o en contra:

Ventajas potenciales

- ✓ Reducen la dependencia del petróleo, mejorando la competitividad al no tener que importarse fuentes de energía tradicionales.
- ✓ Incorporan nuevas alternativas agrícolas, fomentando emprendimientos e innovaciones tecnológicas y revitalizando las economías rurales.
- ✓ Proporcionan una fuente de energía reciclable y por lo tanto son renovables.

✓ Provocan menores emisiones de gases con efecto invernadero (CO₂), permitiendo el acceso a los beneficios del MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio) del Protocolo de Kyoto y al mercado de bonos de carbono.

Desventajas potenciales

✓ Posible influencia en el costo de los alimentos por una mayor competencia por recursos (tierra, agua, etc.) dependiendo de la zona de producción.

✓ Algunos problemas contaminantes de fases de industrialización (ej.: vinaza).

✓ Se requiere que las tecnologías utilizadas en el conjunto del proceso proporcionen balances energéticos con saldo positivo y que los productos derivados sean equivalentes a las de la procedencia fósil, tanto desde el punto de vista de las características comerciales como de los precios del mercado. Hay opciones de cultivos energéticos que no cumplen con este requisito primordial.

¿POR QUÉ SORGO DULCE?

Entre los cultivos que se manejan para la producción de biocombustibles, el sorgo dulce (*Sorghum bicolor* L. Moench) puede presentar ventajas comparativas frente a otros cultivos que lo harían un excelente alternativa energética para nuestro país. Presenta una gran adaptabilidad debido a características morfológicas y fisiológicas, dentro de las cuales se incluyen un extenso sistema radicular, la cubierta de cera en las hojas que reduce las pérdidas de agua y la capacidad de detener su crecimiento en períodos de estrés hídrico y de retomarlo cuando las condiciones vuelven a ser favorables. Además, al presentar una gran rusticidad, aparece como el más promisorio para adaptarse a las condiciones ambientales (régimen hídrico variable entre años) y edáficas (gran variabilidad de suelos) de nuestro país.

La preferencia del sorgo respecto a otros cultivos energéticos está basada en sus menores requerimientos de agua y nitrógeno para producir biomasa, en su tolerancia a condiciones de estrés hídrico y en su uso potencial alternativo como forraje en sistemas de producción animal. Por ejemplo, comparado con la caña de azúcar, el sorgo azucarado requiere un tercio menos de agua y nitrógeno por quilogramo de biomasa producida. Trabajos realizados han demostrado que el sorgo dulce ha tenido mayor eficiencia de uso del agua que maíz, y que sólo requirió un 36% del nitrógeno que necesitó este cultivo cuando su destino fue la producción de grano. Otros estudios han mencionado que el rendimiento de etanol de sorgo dulce por hectárea ha sido superior al producido mediante grano de maíz. El sorgo es reconocido además como uno de los cultivos de mayor eficiencia de uso de la radiación interceptada (3,6g de MS/MJ de la radiación fotosintética activa absorbida). Es un cultivo que, además del empleo de los azúcares fermentables para etanol, presenta una importante producción de granos, despunte de hojas y bagazo (residuo de la extracción de los azúcares) cuyo destino puede ser energía para el proceso de fabricación de etanol, de raciones, etc. Otra ventaja es que presenta un corto ciclo (90-140 días) y po-

dría rápidamente entrar en rotaciones de cultivo y pasturas.

Una de las características negativas que presenta el sorgo para la industria es que debe llegar al ingenio escalonadamente porque no puede ser almacenado por más de 48 horas, debido al desdoblamiento de los azúcares simples en el tallo. Esto pone una condición de producción para el productor, ya que de esta manera no podría sembrar una sola época y variedad sino que debería escalonar fechas de siembra y/o sembrar variedades con largos de ciclo contrastantes.

CARACTERÍSTICAS DEL SORGO DULCE

El sorgo es originario del noreste de África, donde se encuentra la mayor variabilidad de especies silvestres y cultivadas. Probablemente fue domesticada en Etiopía por medio de selección de sorgos silvestres entre 5000 y 6000 años atrás. De este centro de origen fue distribuida hacia toda África, posteriormente hacia el Medio Oriente y desde éste hacia India hace 3000 años. El sorgo fue introducido en América por los esclavos venidos del oeste africano. A fin del siglo XIX fue reintroducido como cultivo comercial.

El sorgo dulce es una gramínea vigorosa con altura entre 2-4m y ciclo anual (puede comportarse como perenne en inviernos cálidos). Puede producir uno o más macollos, que inicialmente emergen de la base del tallo y posteriormente de los nudos basales. El sistema radicular consiste de raíces adventicias fibrosas (0,9m de profundidad) que emergen de los primeros nudos del tallo.

Es uno de los cultivos más eficientes en la transformación de la energía solar en alimento y fibra, por eso se lo considera también como una promisoría fuente productora de energía renovable. Los jugos extraídos de los tallos de sorgo dulce representan aproximadamente el 50% de su peso y son ricos en monosacáridos y disacáridos (glucosa, fructuosa y sacarosa) fácilmente fermentables para la obtención de etanol. La calidad del jugo extraído de los tallos se mide por el total de sólidos solubles en el jugo (°BRIX; rango 15-23%) y por la composición de esos sólidos, particularmente el contenido de sacarosa (POL) y de otros sólidos fermentables (Woods, 2001).



Vista parcial del ensayo de riego en la zafra 2005-2006.

APTITUD CLIMÁTICA DEL URUGUAY

No existirían limitantes en el país desde el punto de vista del régimen hídrico y tipo de suelos, salvo excepciones (planosoles, litosoles), para que el cultivo presente desarrollo y crecimiento acordes a su potencialidad.

ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS

Si bien existen investigaciones sobre prácticas de manejo para el sorgo dulce desde la década de 80, éstas fueron realizadas con tecnologías correspondientes a un potencial de rendimiento limitado para los tiempos actuales (Cassou *et al.*, 1983; Mazziotto, 2006). Hoy en día, con la aparición de tecnologías de producción más avanzadas (siembra directa, fertilización, etc.) y de variedades modernas, se hizo necesario determinar la mejor combinación posible de medidas de manejo para optimizar el rendimiento del sorgo dulce.

El grupo de Cereales y Cultivos Industriales de la Estación Experimental «Dr. M. A. Cassinoni» (EEMAC) ha venido investigando, desde 2005, diferentes manejos con el objetivo de evaluar su potencial de rendimiento como sistema de producción de energía y su efecto en la calidad del recurso suelo.

Se han realizado ensayos en la EEMAC, en Paysandú, en la Estación Centro Regional Sur (CRS) en Joanicó, Canelones y en la Estación «Bernardo Rosengurt» (EEBR) en Cerro Largo. Dentro de las variables de manejo para potencializar la producción de etanol, se han estudiado época y densidad de siembra, fertilización N-P, riego, rotación de cultivos y pasturas y material genético.

a) Época, densidad de siembra y variedades

Con respecto a la época de siembra, cabe aclarar que determinar cuál es la óptima para una zona no es el único objetivo ya que, como se dijo anteriormente, esta materia prima no puede almacenarse como si fuera un grano. Considerando esto y que, además, la industria tendrá un tope de procesamiento diario según sea su tamaño, la época de siembra será la que regule la cosecha, como se hace en el cultivo de caña de azúcar.

En los ensayos realizados en dos localidades en la zafra 2006-2007 se obtuvieron los mejores rendimientos medidos como tallos limpios (sin hojas y panojas) en las siembras de noviembre y diciembre (55 y 47 t/ha, respectivamente), mientras que la siembra de enero determinó el menor rendimiento (23 t/ha) promedio de ambas localidades. Estos resultados confirmaron los obtenidos en la zafra 2005-2006, donde las siembras posteriores a diciembre afectaron de manera drástica el rendimiento, debido al no aprovechamiento de la mayor radiación y temperatura ofrecidas en las otras épocas.

Otro de los manejos que se ha propuesto para el caso de las épocas de siembra es el momento de cosecha (corte de tallos). Desde el punto de vista de la calidad (azúcares totales), cortes tempranos (floración-grano lechoso) el sorgo dulce ha mostrado valores de °Brix bajos, pudiendo tener menores rendimientos en etanol. Por el contrario, en cortes desde grano pastoso en adelante, los contenidos de azúcares han sido los más altos, lo que hace

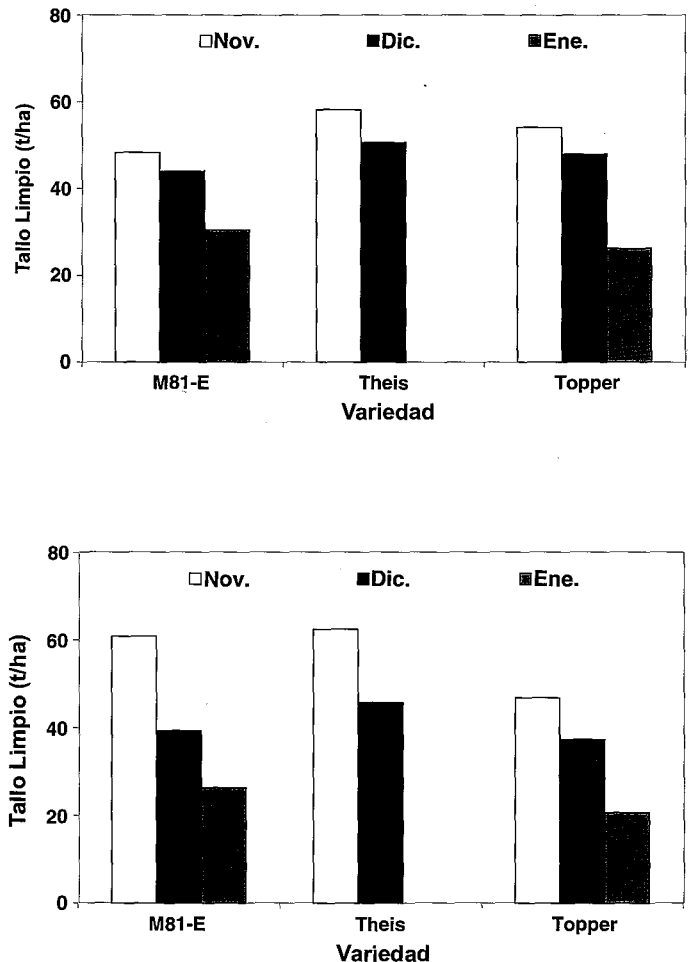


Figura 1. Rendimiento de sorgo dulce en tallo limpio (t/ha) en la EEMAC (A) y en EEBR (B) según época de siembra y variedad para el año 2006-2007.

muy recomendable este tipo de manejo.

En la Figura 2 se presentan, para estos mismos ensayos (localidad, época y variedad), las relaciones encontradas entre densidad de tallos por metro cuadrado a cosecha y peso individual de éstos con rendimiento por hectárea. Puede verse que el rendimiento depende de estos dos factores, obteniéndose mejor relación con peso individual del tallo que por su densidad para la época de diciembre y enero, siendo la de noviembre la menos asociada.

Albano y Martínez (2007) obtuvieron mejores rendimientos con poblaciones altas (14 plantas/m²) que con bajas poblaciones (7 plantas/m²). La utilización de altas poblaciones ha resultado en mayor cantidad de tallos cosechados por unidad de área (17 tallos/m² contra 22 tallos/m², respectivamente) (Cuadro 1). Si bien la utilización de menor población tuvo un efecto en mayor peso de tallo individual (10g), esta variable fue de baja incidencia, y el mayor impacto estuvo en lograr la mayor cantidad de tallos a cosecha.

Estos autores evaluaron la calidad del jugo extraído, con tra-

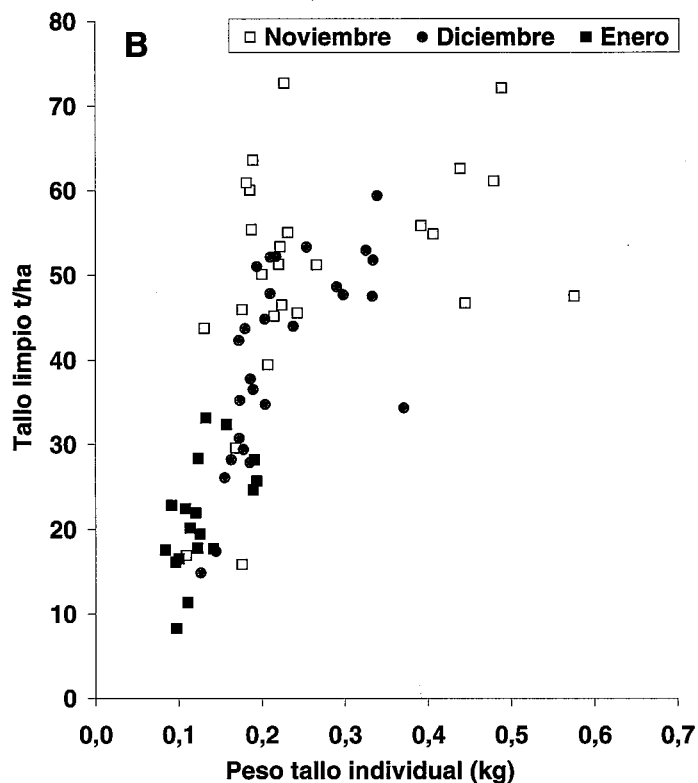
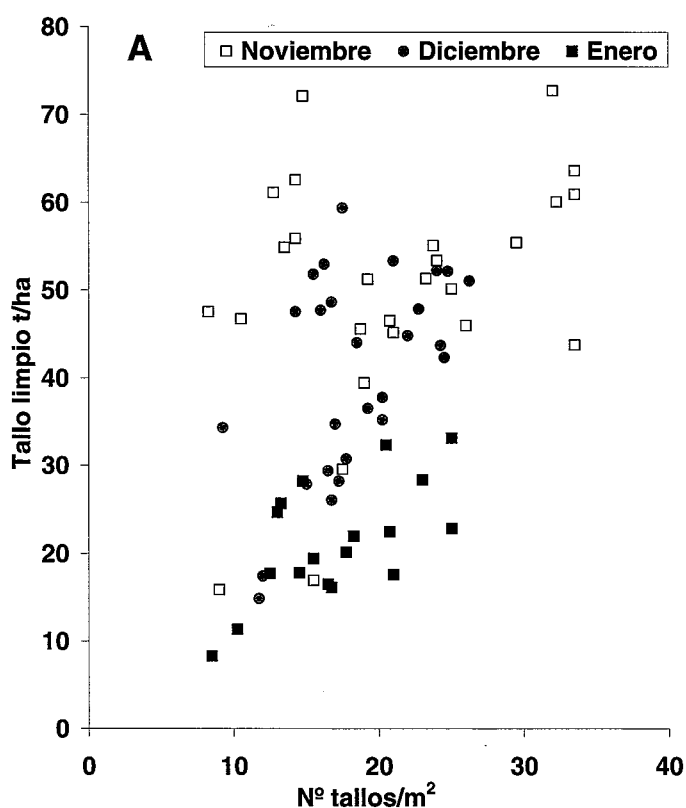


Figura 2. Relación entre número de tallos/m² y rendimiento en tallo limpio/ha (A) y peso individual de tallos y rendimiento de tallo individual limpio/ha (B), según época de siembra. Promedio de 3 localidades (EEMAC, CRS, EEER) y tres variedades de sorgo dulce (M81-E, Theiss, Topper).

Cuadro 1. Población final de tallos a cosecha y su respectivos pesos individuales según densidad de plantas en la EEMAC (Albano y Martínez, 2007).

Parámetros	Población	
	Alta	Baja
Nº de tallos/m ²	21,200	16,300
Peso individual tallo (kg)	0,340	0,350
Rendimiento tallo limpio fresco (t/ha)	72,260	57,420

Cuadro 2. Respuesta del sorgo dulce, medida en tallos limpios (t/ha), al agregado de agua suplementaria para tres años de evaluación en la EEMAC (promedio de dos variedades).

Años	Sin Riego (t/ha)	Con Riego (t/ha)	Agua adicional (mm)	Respuesta kg/mm
2005	61,6	85,0	200	+ 117
2006	55,0	50,0	125	- 42
2007	40,1	51,3	450	+ 25

piche, de los tallos frescos, según densidad de siembra (14 y 7 plantas/m²) y el material genético utilizado (Figura 3). Se encontró mayor contenido de sólidos solubles totales (Brix) al utilizar la variedad Topper comparada con la variedad M81-E y no hubo diferencias entre las poblaciones evaluadas. Cabe destacar los altos valores de sólidos solubles totales encontrados, que son un estimador del contenido de azúcar en los tallos, mostrando el gran potencial para transformar azúcar en etanol en nuestras condiciones.

En el manejo varietal no se han encontrado diferencias sustanciales hasta el momento entre los materiales evaluados, con respecto a rendimiento medido como toneladas de tallos limpios

frescos/ha. Cabe mencionar que en el manejo del largo de ciclo, una característica que debería ser muy importante en la estrategia de cosecha para la industria, no hay muchas opciones ya que existen pocos días de diferencia en los materiales evaluados. Por el contrario, se han detectado diferencias varietales con respecto al vuelco. La variedad Topper presenta una caña más fuerte (menor relación altura/diámetro), por lo que es menos susceptible al vuelco. Hay que recordar que todos los materiales pueden llegar hasta los 3-4-m de altura, siendo muy difícil, frente a tormentas de fines de verano y comienzos de otoño, que el cultivo resista el vuelco con producciones de biomasa aérea que pueden llegar a las 120 toneladas en base fresca.

b) Riego

Se han observado respuestas al riego suplementario en años con deficiencia hídrica y respuestas nulas o negativas pero cuando el agua no fue limitante. Así, hubo respuesta al agregado de riego en los años 2005 y 2007 y no la hubo en el año 2006 (Cuadro 2). Si se compara el régimen hídrico de estos años, el 2005 tuvo un déficit de 250mm en la estación de crecimiento, con respecto al promedio histórico para los meses evaluados, por lo que la alta respuesta al agregado de agua era esperable. Sin embargo, la respuesta al agregado de agua encontrada en 2007 fue menor, a pesar del déficit hídrico ocurrido (300mm). Por el contrario, en 2006 hubo un superávit de 250mm, por lo que no hubo respuesta al agregado de agua adicional (125mm). En cuanto a las respuestas en quilogramos de tallos limpio por milímetro agregado de agua, en 2005 hubo un incremento de más de una tonelada de tallo limpio con el agregado de 10mm. Por el contrario, en el 2007 sólo fue de 250kg por cada 10mm adicionales de agua. Esa respuesta está explicada fundamentalmente por el peso individual de los tallos (más gruesos y altos), ya que el número de tallos finales por superficie no fue afectado por el riego.

FERTILIZACIÓN

El sorgo dulce, por su enorme capacidad de generar biomasa, tiene grandes requerimientos de nutrientes. Cada 65 toneladas de biomasa fresca producida se exportan alrededor de 120, 24 y 11kg de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Es decir que con los rendimientos obtenidos en los ensayos de Uruguay (rango 40-110kg biomasa fresca), se trata de un cultivo que en el mediano plazo puede presentar balances negativos de nutrientes si éstos no se manejan de manera racional.

En términos generales, en los ensayos realizados con un manejo diferencial de N y P, el sorgo dulce tuvo poca respuesta al agregado de estos nutrientes. Cabe aclarar que no se esperaban grandes respuestas al P, ya que en el suelo donde se realizaron los ensayos los niveles de este nutriente no eran bajos (>10 ppm medido como Bray 1). Sin embargo, con respecto al N, sí se podría pensar en grandes respuestas, más aún en años con alto régimen de precipitaciones, en los que se pueden manifestar grandes producciones de biomasa y/o mayores pérdidas de N por lixiviación.

De todas maneras, en el manejo de la fertilización para estos cultivos donde la materia prima es toda la biomasa, al igual que en un silo, el sistema pasa a jugar como un gran exportador de nutrientes. Aquí, el criterio de la fertilización podría implementarse según lo que extrajo el cultivo anterior y no con el criterio de análisis de suelo, si es que se pretende obtener un sistema que sea sostenible en el mediano y largo plazo.

ROTACIÓN

Este manejo es uno de los más importantes desde nuestro punto de vista. Considerando que el volumen de material que debe ser cosechado (aproximadamente 60 t/ha) es similar al de la caña de azúcar, el transporte a una central de procesamiento tie-

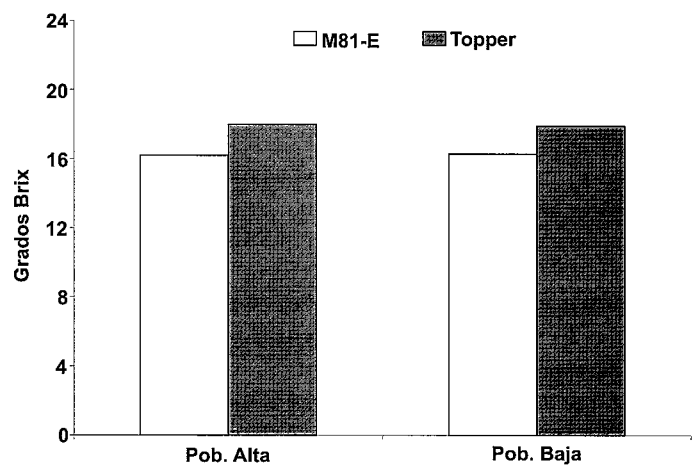
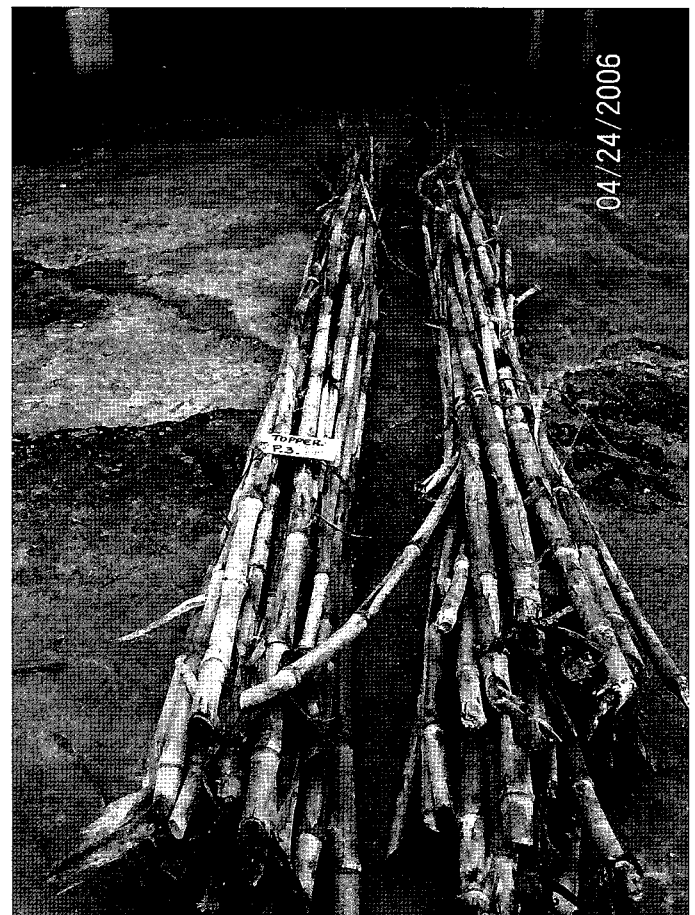


Figura 3. Sólidos solubles totales (° Brix) según variedad y manejo de la densidad de plantas para el año 2005 (Albano y Martínez, 2007).



Vista de los tallos limpios (sin hojas ni grano) para su posterior extracción con trapiche.

ne costos muy altos, dependientes de la distancia de la chacra al ingenio. Esta característica puede llevar a que el cultivo de sorgo dulce se transforme en un monocultivo por una fuerte presión de la logística del transporte (costos), con todos los problemas que esto implica. Este cultivo, que potencialmente presenta una gran cantidad de bondades para la producción de etanol y sus derivados, podría terminar, en el mediano plazo, con una destrucción del recurso suelo por un mal manejo. Plantearse esquemas de producción de energía y/o alimentos que no sean perdurables en el tiempo (ej.: monocultivos), no debería permitirse, más aún con cultivos anuales que no están produciendo durante gran parte del año. Es por ello que en la EEMAC se inició un experimento donde se evalúa el sorgo dulce en diferentes intensidades de uso a través de los años, con los objetivos de evaluar la calidad del suelo y la productividad de los cultivos en el mediano plazo y de lograr la mayor productividad de etanol posible sin deteriorar el suelo y el ambiente. Este experimento plantea esquemas como:

1. sorgo dulce continuo con la utilización de cultivo de cobertura invernal (avena);
2. rotación corta sorgo dulce-2 años de pastura;
3. rotación larga sorgo dulce-3 años de pastura.

CONSIDERACIONES FINALES

✓ Los rendimientos obtenidos en nuestras condiciones muestran que con un manejo adecuado (siembras de noviembre, fertilizaciones normales, objetivo de plantas logradas en el entorno de 12-15/m²) es posible obtener 50 toneladas de tallo limpio fresco/ha con un contenido de azúcares en el rango de 14%. Asumiendo un rendimiento en etanol de 65g de etanol/kg de tallos limpios, teóricamente es posible obtener 3250L de etanol/ha.

✓ Es necesario diversificar el material genético a través de más variedades que tengan diferentes características agronómicas (largo de ciclo, resistencia al vuelco, sanidad, etc.)

para lograr una mejor articulación del proceso agro-industrial.

✓ Resulta obvio que la rentabilidad de este cultivo dependerá del precio por tonelada de biomasa corregida por calidad (contenido de azúcares) y los costos. Si se estiman los costos agrícolas (considerando una distancia de 15km al ingenio) en U\$S 700/ha, el costo por litro de etanol será de U\$S 0,22, sin considerar la fase industrial. Actualmente, el sorgo dulce parece un cultivo energético viable, que presenta ventajas adicionales debido a que los subproductos industriales pueden ser utilizados como alimento (raciones) y/o para la generación de energía para el propio proceso.

✓ Su estabilidad en los rendimientos y, por ende, su rentabilidad como alternativa económica para los productores, dependerá del manejo del cultivo. Si el costo del flete determinara que el sistema sea monocultivo de sorgo dulce por la distancia al ingenio, se consideraría una alternativa destinada al fracaso, ya que no hay sistema que se mantenga sin contemplar que el suelo es un recurso no renovable. No se debe olvidar la enseñanza que dejó la remolacha azucarera.

✓ Para las condiciones ambientales del Uruguay, el sorgo dulce puede ser una alternativa más en el sistema, al incorporarlo en rotaciones de cultivo y pasturas, permitiendo una explotación más racional del suelo y diversificando las opciones productivas.

✓ El planteo de la producción de biocombustibles se basa en integrar otra alternativa económica al sistema, sin que ésta vaya en detrimento de la producción de alimentos, como es planteado por algunas asociaciones. Además, si se considera que todos los subproductos del sorgo dulce pueden integrarse a la cadena de la leche o de la carne a través de las raciones, es claramente una opción, que para nuestras condiciones, suma y no sustituye. Porque, en definitiva, un productor rural que se va a la ciudad es también un recurso no renovable.

✓ Parece lógico y obligatorio pensar en un desarrollo sostenible para la producción de bioenergía, que satisfaga las necesidades de las actuales generaciones sin afectar la capacidad de las futuras. 🌱

BIBLIOGRAFÍA

ALBANO, S.; MARTINEZ, M. 2007. Efecto de la época de siembra, densidad y cultivar sobre la productividad del sorgo dulce. Tesis de Ingeniero Agrónomo Montevideo. Facultad de Agronomía. 90 p.

CASSOU, S.; VALDENEGRO, J. G.; VERDE, R. 1983. Efecto de tres factores de producción en sorgo sacarígeno. Tesis Ingeniero Agrónomo. Montevideo. Facultad de Agronomía. 158 p.

MAZZIOTTO, J. 2006. Agro-ecología y biocombustibles, herramientas para el desarrollo. 1^{era} Edición. Montevideo, Hemisferio Sur. 226 p.

WOODS, J. 2000. Integrating sweet sorghum and sugarcane for bioenergy: Modeling the potential for electricity and ethanol production in Zimbabwe. PhD Thesis, King's College London. 211 p.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración recibida de la Empresa Azucarlito, a los Ings. Agrs. Jorge Mazziotto y Alfonso Marques y al personal de la EEMAC, CRS y EEBR de la Facultad de Agronomía.