

Integración del sorgo azucarado a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina⁺

Eduardo R. Romero*, Gerónimo J. Cárdenas**, Marcelo Ruiz***, Sergio Casen*, Pablo Fernández González*, Agustín Sánchez Ducca*, B. Silvia Zossi***, Guillermo De Boeck**, Carlos Gusils***, Javier Tonatto*, Mercedes Medina*, Roque Caro**** y Jorge Scandaliaris*

Introducción

Los cultivos energéticos, cuyo objetivo es la producción de biomasa con alto potencial bioenergético, están despertando mayor interés durante los últimos años. Una de las razones principales es que la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles ayudará a reducir tanto las emisiones de CO₂ a la atmósfera, como el uso de los derivados del petróleo. Además, su producción se puede planificar, contribuyendo al abastecimiento sostenible de biomasa y energía.

En la última década, los biocombustibles líquidos han adquirido importancia creciente a nivel global, con una particular participación en el sector del transporte. Entre estos, el bioetanol, producido con eficiencia y sostenibilidad, es capaz de atender las demandas urgentes para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y competir en precio con las energías convencionales (Cárdenas *et al.*, 2007).

En este contexto, resulta de gran importancia sostener la investigación sobre la producción de biomasa a partir de cultivos energéticos, las tecnologías de transformación para la fabricación de biocombustibles líquidos y el uso de los residuos fibrosos para la generación de energía calórica y la cogeneración de electricidad.

La producción comercial de bioetanol se realiza empleando dos tipos de materia prima: las azucaradas y directamente fermentescibles o las amiláceas, en las que el almidón debe ser sacarificado antes de su fermentación. Una tercera vía (bioetanol de segunda generación) se basa en la utilización de materiales celulósicos, que deben ser hidrolizados para generar una solución de azúcares fermentescibles. Esta tecnología, aún no disponible a escala comercial, despierta grandes expectativas.

Considerando los cultivos energéticos de mayor interés para la producción de bioetanol, en la Tabla 1 se presentan valores de rangos de producción

Tabla 1. Productividad promedio de bioetanol por tonelada y por área, balance energético y emisiones GEI evitadas para diferentes cultivos.

Cultivos	Biomasa (t/ha)	Etanol (l/t)	Etanol (l/ha)	Balance energético	Emisiones GEI evitadas
Caña de azúcar	60-90	75	5800	09-12	85-90 %
Sorgo azucarado	50-80	40	2500	5-8	60-70 %
Remolacha azucarera	35-60	110	6000	1,2-2,1	35-55 %
Maíz	07-12	360	4000	0,6-2	-30 a - 40
Trigo	5-7	340	1800	1-1,1	19-45%
Residuos lignocelulósicos	variable	400	variable	8-9	65-75%

Fuente: BNDS (2008) y datos propios.

⁺ Trabajo subsidiado por un Proyecto Federal de Innovación Productiva PFI 2008 – Mincyt 2010-2012.

* Ing. Agr., Sección Caña de Azúcar. ** Ing. Qco., Sección Ingeniería y Proyectos. *** Ing. Qco., Sección Química, EEAOC. **** Ing. Agr., Cátedra Cultivos Industriales, FAZ – UNT.

de biomasa, de rendimiento alcohólico, balance energético y del nivel de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), destacándose la caña de azúcar y el sorgo dulce.

Los análisis de ciclo de vida efectuados para el bioetanol de caña de azúcar y de sorgo dulce son muy prometedores, especialmente cuando se aprovechan el bagazo y los residuos de cosecha para la producción de electricidad y vapor asociado al proceso de la destilación. Además, se destaca la capacidad de estos cultivos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que constituyen materias primas idealmente complementarias por productividad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental, permitiendo optimizar el uso de los bienes de capital a través de su integración.

El sorgo azucarado: un cultivo energético promisorio

El sorgo dulce, azucarado o sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es un cultivo multifuncional de alto potencial, por su elevada productividad (entre 20 t a 50 t de materia seca/ha) en ciclos cortos de producción (tres a cuatro meses), por la amplia gama de productos alimenticios e industriales que provee y, actualmente, por su elevado potencial para proporcionar productos bioenergéticos.

Es un cultivo de valor universal, ya que puede producirse en todos los continentes, tanto en regiones tropicales y subtropicales como templadas, en tierras de mediana y baja aptitud agrícola, siendo especialmente apto para regiones con escasa pluviometría.

El sorgo dulce se caracteriza por poseer tallos con jugos ricos en azúcares, similares a los de la caña de azúcar, que pueden utilizarse para la producción de bioetanol a partir de su fermentación y además, suministrar bagazo y residuos de cosecha como subproductos fibrosos, útiles para su empleo directo como biocombustible sólido especialmente para la cogeneración de electricidad. También resultan útiles los “sorgos fibrosos”, caracterizados por la cantidad y calidad de la fibra de sus tallos, que por su particular longitud, además de su aprovechamiento bioenergético, también resultarían de interés para la fabricación de papel.

Existe un renovado interés en el sorgo dulce debido a su adaptabilidad y comportamiento bajo condiciones climáticas adversas, a lo que se agrega un nuevo escenario: el desarrollo de biocombustibles. El sorgo dulce constituye una especie particularmente interesante, ante la necesidad de producciones sustentables posibles de desarrollarse en nuestra región.

El sorgo dulce, asociado a las siguientes características, es un cultivo muy adecuado para la producción de biocombustibles en áreas de baja precipitación (Almodares and Hadi, 2009; Mazziotto, 2005):

- Como especie C4, es un eficiente convertidor de la energía solar en biomasa, ya que con un bajo

requerimiento de insumos, produce una elevada cantidad de carbohidratos.

- Es uno de los cultivos de mayor eficiencia de uso de la radiación solar (de 1,4 a 2,8 g de biomasa /MJ).

- Presenta un bajo costo de energía metabólica para la construcción de biomasa (carbohidratos).

- Tiene un elevado potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

- Tiene un ciclo de producción corto (de tres a cuatro meses) y es un cultivo eficiente en el uso del agua, tolerante a la sequía y con cierta tolerancia a salinidad.

- Tiene una gran capacidad de producción de biomasa, con elevado potencial para la producción de bioetanol y biocombustibles sólidos, por el contenido de azúcares fermentecibles (AFT de 12% a 20%) en el jugo de sus tallos y su tenor de fibra (de 14% a 18%).

- Su bagazo y los residuos de cosecha tienen valor bioenergético, similar al de la caña de azúcar.

- Es ideal para implementar sistemas de rotación, como en el caso de la soja, por la cantidad de rastrojo residual que deja en el campo y su extendido sistema radicular.

Aunque todavía no exista una producción significativa de bioetanol a partir de sorgo sacarino a nivel mundial, algunos expertos internacionales lo reconocen como potencial fuente de materia prima para la fabricación de bioetanol. Sin embargo, su utilización con este objetivo aún está en una etapa de desarrollo relativamente temprana de desarrollo y se requiere una intensa actividad de investigación para disponer de materiales genéticos adecuados y adaptar su manejo agronómico.

Las primeras experiencias comerciales de su empleo se llevaron a cabo en India, China y recientemente en Brasil, pero su explotación se encuentra en una etapa inicial de desarrollo. Resulta necesario emprender proyectos de investigación que permitan obtener nuevos materiales genéticos (Ratnavathi *et al.*, 2010).

Importancia para Tucumán y el Noroeste Argentino (NOA)

La composición de la matriz energética de nuestro país está limitada y fuertemente concentrada (casi 90%) en el uso de combustibles no-renovables (hidrocarburos). Por esto, existe interés a nivel nacional y regional en la producción de biocombustibles derivados de cultivos agrícolas para atender la creciente demanda de energía y reducir el uso de derivados del petróleo. El bioetanol es una opción muy importante para complementar el consumo de naftas y bajar el consumo de hidrocarburos no renovables.

Indudablemente la caña de azúcar, cultivo fuertemente arraigado en el NOA, y el sorgo sacarífero, especie que se perfila como su complemento ideal, pueden hacer importantes aportes para la diversificación de la matriz energética argentina (Romero *et al.*, 2010).

Las razones de porqué el sorgo azucarado constituye el cultivo complementario ideal a la caña de azúcar son:

- Integración a la misma cadena productiva: por la similitud de sus productos bioenergéticos, de los procesos de producción, sus elevadas eficiencias energéticas y su bajo impacto ambiental.
- Integración temporal: ampliación del período de producción bioenergética.
- Integración de infraestructura disponible y reducción de costos agroindustriales: aprovechamiento común de equipamiento agroindustrial ya disponible para (cultivo, cosecha, transporte, molienda, fermentación, destilación, etc.).
- Integración espacial: utilización de áreas de producción agrícola no competitivas y cercanas a los ingenios - destilerías.
- Aportes a la sustentabilidad: conservación y mejora de los suelos, posibilidad de realizar rotación de cultivos, aprovechamiento de recursos, biodiversidad, sanidad, rentabilidad, etc.

La incorporación del sorgo azucarado a la actividad agroindustrial azucarera de la región, utilizándolo como cultivo de rotación de la soja, como reemplazo en áreas cañeras con limitaciones o en zonas actualmente no aprovechadas por sus res-

tricciones hídricas o de salinidad, permitiría ampliar el abastecimiento de materia prima a las destilerías de bioetanol ya existentes, especialmente en los meses previos al inicio de la zafra azucarera (abril-mayo).

La información respecto de los genotipos aptos de sorgo dulce y de criterios y tecnologías agronómicas para su manejo y cosecha en su integración a la cadena de la caña de azúcar, es aún limitada. Por esto en 2006, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) restableció el Programa Bioenergía y, dentro de este, generó el Proyecto Cultivos Energéticos. La institución, con el significativo apoyo de empresas privadas, trabaja en la detección de materiales genéticos de sorgo sacarífero que satisfagan los requerimientos de las industrias alcohólicas y en el ajuste de las mejores prácticas de manejo agronómico (Figura 1).

Luego de tres años de experimentación, en la campaña 2009/2010 se lograron importantes avances. De los 27 híbridos evaluados, se preseleccionaron 12 materiales de acuerdo a criterios de calidad industrial (ART %) y aptitud agronómica, además de emplear como testigos tres variedades tradicionales de sorgo azucarado con características alcohólicas conocidas (Tabla 2).



Figura 1. Vista de los ensayos con sorgo azucarado y fibroso efectuados por el Proyecto Cultivos Energéticos de la EEAOC. Las Talitas, Tucumán.

Tabla 2. Rendimiento agronómico y fabril de materiales seleccionados (híbridos y variedades) provistos por distintos semilleros en Orán, Salta. Lluvias acumuladas: 330 mm.

Materiales	Peso/tallo (kg)	Producción tallos molibles (t/ha)	Altura (m)	Diámetro (mm)	BRIX %	AFT %
SWS (4)	0,36-0,55	50-78	2,5-3,4	17-18	15 – 18	13-16
Advanta (6)	0,41-0,52	55-75	2,9-3,2	17-21	16 – 19	14-17
Argenetics (2)	0,33-0,44	45-60	2,6-2,8	18-19	17 – 20	14-18
Variedades (3)	0,38-0,49	50-70	2,5-2,75	19-20	14 – 20	11-17

Los valores de ART alcanzados por los nuevos materiales preseleccionados estuvieron entre los 14% y 19%, los cuales se mantuvieron por un período mayor a veinte días con rendimientos de tallos limpios entre 47 t/ha y 77 t/ha (bajo un régimen pluviométrico de 330 mm) y con desempeños similares a las variedades alcoholígenas testigo. Además, en estos materiales se conjugaron otros aspectos agronómicos y sanitarios de interés.

Asimismo, se implantaron macroparcelas para evaluar distintos aspectos agronómicos (diseños y densidades de siembra, manejo de malezas y fertilización), en especial la adaptación de este cultivo a la cosecha con máquinas integrales de caña de azúcar. En estas evaluaciones preliminares se demostró la factibilidad del empleo de equipamiento cañero en la cosecha del sorgo azucarado. Las evaluaciones arrojaron porcentajes de materias extrañas en el orden del 10% al 20% y pérdidas de materia prima del 9% al 14%, valores interesantes si se considera que las cosechadoras utilizadas estaban reguladas para cosecha convencional de caña de azúcar, por lo que es necesario seguir trabajando con este nuevo cultivo para optimizar su cosecha.

Dentro de los criterios de selección también es importante tener en cuenta la extracción de jugos, contenidos de azúcares fermentescibles, fibra y producción de etanol por tonelada (Tabla 3). Las pruebas de fermentación en laboratorio efectuadas en tres variedades muestran óptimos valores de eficiencia fermentativa, permitiendo proyectar una productividad potencial de bioetanol del sorgo azucarado de 59 a 68 l/t de tallos molibles. Además, las levaduras comúnmente utilizadas para la fermentación de melaza de caña de azúcar se adaptaron perfectamente al jugo de sorgo azucarado (Liu *et al.*, 2008).

Asimismo, los análisis realizados a la fibra del sorgo azucarado (fibra %, poder calorífico, humedad

% y cenizas %) mostraron que este material presenta óptimas cualidades para ser utilizado como combustible en calderas bagaceras, con un poder calorífico superior (PCS) promedio de 4198 kcal/kg, que no difiere de los valores normales del bagazo de la caña de azúcar, y con un nivel promedio de cenizas en fibra del 3,1 (%base seca), algo superior al del bagazo de caña, pero dentro del rango aceptable para su combustión. Por lo cual, el bagazo del sorgo dulce tiene propiedades similares al de la caña de azúcar como combustible sólido y se espera que las instalaciones en los generadores de vapor se adapten perfectamente para su uso energético.

Si bien la EEAOC ha priorizado hasta ahora la evaluación de sorgos dulces alcoholeros, entre los materiales evaluados se incluyeron algunos de tipo fibroso y alto potencial de biomasa, cuya información preliminar se muestra en la Tabla 4.

Estos cultivares de tipo energético, que se destacan por su elevada capacidad de producción de biomasa, alto contenido de fibra y PCS similar al del bagazo de caña de azúcar, asociado a tallos con escaso volumen de jugo y pobre en ART, aportan un material biomásico útil para ser quemado en calderas de biomasa, a fin de generar energía calórica o bioelectricidad.

Obviamente, la implementación y empleo agroindustrial de este cultivo exige una intensa actividad de investigación y desarrollo, a fin de ajustar todos sus aspectos productivos y de aprovechamiento industrial, tarea a la que la EEAOC está intensamente abocada.

La calidad fabril de dicho material se observa en la Tabla 5.

Consideraciones finales

El sorgo dulce pertenece al grupo de los cultivos tipo C4, de alta eficiencia fotosintética y produc-

Tabla 3. Eficiencia fermentativa y productividad del sorgo azucarado.

Variedad	Brix [%]	AFT [g/100ml]	Fibra [%tallo]	Extracción [Kg _{jugo} /Kg _{tallo}]	Productividad [l _{alcohol} /T _{sorgo}]
Theis	16,2	14,4	11,00	0,73	58,9
Topper	17,2	16,4	11,10	0,76	68,3
M81	17,5	16,7	12,43	0,75	66,8

Tabla 4. Componentes del rendimiento y producción de un híbrido fibroso en dos localidades en Tucumán. Monte Redondo: 350 mm; Leales: 580 mm. Enero- mayo 2009.

Localidad	Producción tallos molibles (t/ha)	Biomasa tallos molibles (t/ha)	Producción verde aérea (t/ha)	Biomasa aérea (t/ha)
Monte Redondo	70 - 80	20 - 25	90 - 110	25 - 30
Leales	80 - 120	25 - 35	100 - 150	30 - 45

Tabla 5. Fibra, sólidos solubles totales, azúcares fermentescibles totales y poder calorífico superior de un híbrido fibroso en Tucumán, estimados en la cosecha.

Localidad	Fibra %	Brix %	AFT %	PCS [kcal/kg]
Leales	16 -18	07-09	04-06	4.232

tividad; tiene un elevado potencial para la producción de biocombustibles (bioetanol, energía calórica y bioelectricidad) por su alto tenor de fibra (entre 14% y 18%) y elevado contenido de azúcares fermentescibles en el jugo de sus tallos, compuestos principalmente por sacarosa (de 70% a 80%), fructosa y glucosa.

La incorporación del sorgo azucarado a la actividad agroindustrial de la caña de azúcar, utilizándolo como cultivo de rotación de soja o como reemplazo en áreas cañeras con limitaciones hídricas o de salinidad, permitiría ampliar el abastecimiento de materia prima a las destilerías de bioetanol ya existentes durante los meses previos al inicio de la zafra, aportando asimismo biomasa fibrosa para su empleo como biocombustible sólido.

El Programa Bioenergía de la EEAOC trabaja intensamente, junto a empresas privadas, en el desarrollo agroindustrial del sorgo azucarado, habiendo logrado avances significativos que en poco tiempo permitirán la inserción e integración de este nuevo cultivo energético a la cadena de la caña de azúcar.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ingenio Tabacal, a la Empresa Bulacio Argenti y a los distintos semilleros (SWS, Advanta, Argenetics, Tobin, Satus Ager y otros) que apoyan la tarea de la EEAOC en el desarrollo de este nuevo cultivo energético.

Bibliografía citada

- Almodares, A. and M. R. Hadi. 2009.** Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *Afr. J. Agric. Res.* 4 (9): 772-780
- Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES). 2008.** Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible. 1. ed. Coordinación BNDES y CGEE, Río de Janeiro, Brasil.
- Cárdenas, G. J.; O. Diez y E. Quaiá. 2007.** Bioetanol: un combustible con posibilidades productivas en Tucumán. *Avance Agroind.* 28 (1): 9-11.
- Liu, R.; J. Li and F. Shen. 2008.** Refining bioethanol from stalk juice of sweet sorghum by immobilized yeast fermentation. *Technical Note. Renewable Energy* 33 (5): 1130-1135.
- Mazziotto, J. 2005.** Agroecología y biocombustibles, herramientas para el desarrollo. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo, Uruguay.
- Ratnavathi, C. V.; K. Suresh; B. S. Vijay Kumar; M. Pallavi; V. V. Komala and N. Seetharama. 2010.** Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass and Bioenergy* 34 (2010): 947-952. ScienceDirect. [En línea]. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/biombioe> (consultado 25 marzo 2010).
- Romero, E. R.; G. Cárdenas; J. Scandaliaris y S. Casen. 2010.** Aprovechamiento bioenergético integral de la caña de azúcar y del sorgo azucarado en el NOA. *Importancia y perspectivas. Avance Agroind.* 31 (3): 19-25.



COTA Ltda.
COOPERATIVA DE PRODUCTORES CITRICOLAS de TAFI VIEJO

JUGO CONCENTRADO
ACEITE ESENCIAL
CASCARA DESHIDRATADA

Diagonal a Tafi Viejo Km. 6 - 4103 - Tafi Viejo - Tucumán - Argentina
Tel/Fax: (54-381) 4 61-8626 / (54-381) 4 61-8983
E-mail: cota@cotaltd.com - www.cotaltd.com