

**Universidad Tecnológica
Nacional**
Facultad Regional Tucumán
Escuela de Posgrado

**POTENCIAL DEL SORGO AZUCARADO
COMO UN CULTIVO COMPLEMENTARIO
DE LA CAÑA DE AZÚCAR PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA**

Ing. Qca. Norma Eliana Soledad Medina

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico
Superior de Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutora: Dra. Silvia Zossi

San Miguel de Tucumán

Año 2018

Resumen

Los cultivos energéticos están cobrando relevancia en los últimos años, asociado a que la sustitución de los combustibles fósiles por los biocombustibles ayuda a reducir tanto las emisiones de CO₂ a la atmósfera, como el uso de los derivados del petróleo. Además, su producción se puede planificar, lo que contribuye al abastecimiento sostenible de biomasa y energía (BNDES. 2008).

En los últimos tiempos, los biocombustibles líquidos han adquirido una mayor importancia especialmente en el sector del transporte. El bioetanol, producido con eficiencia y sustentabilidad, es capaz de responder a la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y competir en precio con las energías convencionales.

Los análisis de ciclo de vida efectuados para el bioetanol de caña de azúcar y de sorgo dulce son muy prometedores, especialmente cuando se aprovecha 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 todo lo mencionado, constituyen materias primas idealmente complementarias por productividad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental, permitiendo a través de su integración optimizar el uso de los bienes de capital.

Índice

Introducción _____	4
Objetivo del trabajo _____	6
Características generales del sorgo _____	6
Avances mundiales y locales _____	9
Proceso de producción de etanol _____	11
Sorgo dulce como materia prima para bioenergía _____	18
Disponibilidad de territorio disponible para cultivo de sorgo dulce _____	23
Conclusiones _____	25
Bibliografía _____	26

Introducción

La situación energética mundial y todas las actividades vinculadas con el petróleo, son motivo de preocupación para los estudiosos de la materia y para importantes asociaciones y centros del mundo dedicados a temas de energía.

En los últimos dos siglos, la energía se ha convertido en un bien indispensable para llevar a cabo casi la totalidad de las actividades personales y productivas. El desarrollo económico y las exigencias del consumo mundial impulsan una demanda creciente y constante de generación de energía. Sin embargo, nuestros recursos son finitos y tienen un límite que pronto será alcanzado. De acuerdo con el BP Statistical Review, en el año 2017 los combustibles fósiles representaron el mayor recurso energético utilizado en el mundo, donde el petróleo contabilizó más del 33 % del consumo primario. El carbón ocupó el segundo lugar (28,1 %), seguido por el gas natural (24,1 %), energía hidráulica (6,9 %), energía nuclear (4,5 %) y otras energías renovables (0,7 %). En Argentina en el año 2016, de acuerdo a datos publicados por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (MINEM), las fuentes fósiles representaron 87 % de la producción total de energía primaria, principalmente el gas natural (54,7 %) y el petróleo (30,81 %), quedando el carbón en último lugar (1,45 %). En cuanto a las fuentes no fósiles, las renovables se ubican en primer lugar (6,25%) seguidas por la energía hidráulica (4,05%) y la nuclear (2,74%). De los datos anteriores se puede observar que existe una gran dependencia, tanto a nivel mundial como a nivel país, de los combustibles fósiles lo cual está llevando al mundo a una difícil situación energética.

A causa del agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles en explotación y por el hecho de que los descubrimientos de nuevos yacimientos se producen a un ritmo menor que el de consumo de los mismos, se puede afirmar que en no mucho tiempo el mundo verá descender su producción de petróleo, el que como ya se mencionó, es el principal recurso energético mundial. En la actualidad ya se puede afirmar que existe o existirá el llamado “cenit del petróleo” o “peakoil”, que es el punto en el tiempo en el cual se alcanza la tasa máxima de extracción de petróleo mundial, después de lo cual la tasa de producción entra en un declive terminal. Sin embargo, esto no significa que el petróleo se acabará abruptamente, sino que su

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

producción irá disminuyendo y a su vez, esta se hará más compleja y costosa, alejándose cada vez más de las cantidades que el mercado demande; además en el mediano y largo plazo su precio se incrementará, situación que ya se evidencia en la actualidad.

Por otro lado es de principal importancia encontrar una solución para la elevada liberación al ambiente de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales provocan un aumento de la temperatura terrestre que trae como consecuencia cambios en las condiciones climáticas del mundo provocando una serie de fenómenos naturales extremos como sequías, olas de calor, inundaciones y temporales.

La concentración atmosférica de estos GEI se está incrementando continuamente, debido fundamentalmente a las cantidades de dióxido de carbono (uno de los principales GEI) que se libera debido a la quema de combustibles fósiles. En Argentina la mayor fuente de este tipo de contaminación es el sector del transporte, el cual contribuye con un 40% del total de dichas emisiones, seguido por la generación de electricidad (28%), residencial y comercial (22%) y las refinerías y producción de cementos (10%) (Pulíafo, 2017).

Se expusieron hasta aquí las dos problemáticas que signan a la crisis energética actual: el agotamiento de los yacimientos petrolíferos y el aumento de los gases de efecto invernadero, lo que provoca un cambio climático marcado.

Como una opción para solucionar los problemas planteados surgen las llamadas Energías Alternativas, que son aquellas que a diferencia de las convencionales, usan como fuente de generación recursos renovables. Entre ellas se encuentra la biomasa, término que se refiere a toda materia orgánica originada en un proceso biológico que puede ser utilizado como fuente de energía. Dentro de este grupo se encuentran los llamados cultivos energéticos a partir de los cuales se pueden obtener combustibles líquidos como el etanol, y además calor y energía. Entre estos cultivos con potencial energético se encuentra el sorgo en sus distintas variedades.

El interés en la producción de bioenergía a partir de sorgo azucarado se debe a su facilidad de acceso a los azúcares fermentables combinado con un alto rendimiento de biomasa. A su vez, su transformación a biocombustible se puede realizar en las plantas de bioetanol diseñadas para procesar caña de azúcar, ya que estas pueden

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

usar fácilmente los tallos del sorgo como materia prima, extrayendo los azúcares del jugo y fermentándolos con levadura para producir etanol.

Objetivo General

El objetivo de este trabajo es presentar un análisis sobre la posible integración del sorgo dulce como un cultivo complementario de la caña de azúcar, de manera tal de optimizar la producción de bioetanol y bioenergía, como así también aumentar la eficiencia en el uso de la tierra, los equipos y otros recursos.

Objetivos Específicos

- Determinar las características generales del sorgo dulce.
- Analizar los avances mundiales y locales con respecto a la producción de sorgo para obtención de bioetanol.
- Analizar el potencial del sorgo azucarado para su integración con la caña de azúcar a partir del estudio de los posibles procesos de producción, la calidad de la materia prima y el área disponible para su cultivo.

Características Generales del Sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cultivos más antiguos y actualmente uno de los cereales de mayor importancia en el mundo (Serna - Saldívar, 2010). Es una planta anual originaria de África y extendida a todos los continentes. Crece en zonas templado – cálidas y en zonas húmedas subtropicales. Su temperatura óptima se ubica entre 25 – 31°C, aunque existen variedades adaptadas para menores temperaturas que generan rendimientos aceptables. Pertenece a las plantas del tipo C4, las cuales forman compuestos de cuatro carbonos, haciéndola más eficiente en el uso del agua, dióxido de carbono y nutrientes. En regiones con clima óptimo es posible obtener varias cosechas de sorgo por año ya sea directamente de semilla o de retoños (Saballos, 2008; Turhollow *et. al.* 2010).

Existe un gran número de variedades, las cuales pueden ser clasificadas en tres grandes grupos: sorgo grano, forrajero y dulce (Tabla 1). Recientemente se creó una nueva categoría de sorgo denominado de alta biomasa. Son híbridos de floración tardía con una etapa vegetativa prolongada, lo cual permite el retraso en el desarrollo de estructuras reproductivas para alcanzar, en condiciones favorables, hasta 6 metros

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

de altura (Chuck, 2011). Este sorgo, a diferencia del sorgo dulce y forrajero, está conceptualizado para producir altos rendimientos de biomasa fibrosa y ser principalmente canalizado a la producción de bioetanol de segunda generación.

Tabla 1: Variedades de sorgo y usos de las mismas

Sorgo	Uso
Sorgo Grano	Alimento para humanos y animales domésticos Fuente de forraje
Sorgo Forrajero	Forraje para ganado
Sorgo Dulce	Producción de azúcar, jarabe y etanol
Sorgo de alta Biomasa	Biomasa lignocelulósica para la producción de etanol o para producción de energía

A su vez cada uno de los grupos de sorgo se puede dividir por características aún más específicas. Todas estas características se encuentran controladas genéticamente y forman parte de la enorme diversidad de genotipos resguardados en la Colección Internacional de Sorgo en la India (World Sorghum Collection) con 37.904 accesiones de 91 diferentes países, la cual se estima que representa alrededor del 80% de variabilidad presente en el sorgo (ICRISAT, 2011).

De los grupos mencionados, el sorgo dulce constituye una especie particularmente interesante ante la necesidad de producciones sustentables posibles de desarrollarse en nuestra región. Esta especie 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. Los tenores de azúcares reductores totales en los tallos no son demasiado diferentes de los encontrados en la caña de azúcar y son directamente fermentables, lo cual le otorga una ventaja por sobre otros cultivos energéticos como por ejemplo los amiláceos, siendo un ejemplo el sorgo granífero. Además, suministra bagazo y residuos de cosecha como subproductos fibrosos, útiles para su empleo directo como biocombustible sólido

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

especialmente para la cogeneración de electricidad. Es decir que el sorgo dulce se puede cultivar tanto para la producción de etanol como para la producción de energía.

Agronómicamente se destaca por su alta tolerancia a un amplio rango de condiciones climáticas y de suelo (altas temperaturas, sequía, inundaciones, salinidad del suelo y toxicidad por acidez), lo cual le permitiría ser cultivado en tierras menos productivas para otros cultivos como la caña de azúcar o el maíz (suelos salinos, alcalinos y de baja fertilidad) (Ganduglia *et. al.*, 2009).

Es uno de los cultivos de mayor eficiencia de uso de la radiación solar, lo cual le permite crecer rápidamente bajo condiciones óptimas de cultivo llegando incluso a superar a la caña de azúcar en términos de biomasa total, producida en cortos períodos de tiempo. Sin embargo, su potencial real reside en el hecho de que es capaz de crecer en condiciones adversas gracias a su eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, la cual combinada con la ya mencionada eficiencia en el uso de la energía, le permite producir tallos ricos en azúcares y fibras en lugares donde otras especies no podrían (Woods, 2001).

A diferencia de la caña de azúcar, el sorgo dulce por lo general no es un cultivo sensible al fotoperíodo, es decir que la acumulación de azúcares en su tallo no depende necesariamente de las horas de luz. Es por ello que este cultivo tiene un rápido crecimiento alcanzando su madurez en un período de entre 3 y 5 meses. Esto permite que esté listo para ser cosechado antes de la temporada de zafra de la caña de azúcar.

Otro beneficio del uso de sorgo dulce como materia prima para producción de bioenergía, es el hecho de que este cultivo, comparado con la caña de azúcar, requiere un tercio menos de agua para producir una tonelada de biomasa. De esta manera se reduce significativamente la cantidad de agua necesaria para la producción de etanol (Roman, 1995; Woods *et. al.*, 1995).

Desde el punto de vista ambiental el sorgo dulce tiene un balance energético superior al de los cereales, la remolacha y la mandioca, y potencialmente similar al de la caña de azúcar. De la misma forma se destaca su elevado potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Romero *et. al.*, 2012). Esto puede observarse en la Tabla 2.

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

Tabla 2: Producción de biomasa por tonelada, balance energético y emisiones GEI evitadas para diferentes cultivos.

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

Fuente: Romero *et. al.*, 2012

Es ideal para implementar sistemas de rotación como en el caso de la soja, debido a la alta cantidad de rastrojo que deja y su lenta descomposición (relación carbono/nitrógeno). Esto permite por un lado contribuir al contenido de materia orgánica del suelo y por otro, manteniendo rastrojos en superficie, disminuir las pérdidas de agua del suelo por evaporación mejorando la infiltración del agua de lluvia.

Por último, por tratarse de un producto de muy baja demanda en los mercados regional y mundial de alimentos, su utilización para la producción de etanol no tendría impacto significativo en los precios de los alimentos y en la seguridad alimentaria.

El sorgo dulce posee también una serie de limitaciones entre las cuales pueden mencionarse los siguientes:

- Posee una reducida resistencia a la degradación una vez cosechado, por lo cual no puede ser almacenado durante mucho tiempo.
- El sorgo dulce posee baja resistencia a plagas y enfermedades.
- El hecho de que temperaturas por debajo de los 16°C afecten su crecimiento, limita sus posibilidades para determinadas regiones y zonas.

Avances Mundiales y Locales

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. En la literatura consultada se reportan investigaciones e informaciones que tratan sobre la obtención de etanol a partir del sorgo dulce en varios países.

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

En la India en los años recientes se ha incrementado el interés en la utilización del sorgo dulce para la producción de etanol debido a la amplia adaptabilidad y rápida cosecha de este cultivo. Desde junio de 2007 está en funcionamiento la primera planta comercial de 40.000 litros de etanol diarios a partir de sorgo.

Por otra parte, en Uruguay desde el año 2005 hasta la actualidad se realizan convenios institucionales entre ANCAP (Petrolera uruguaya), UDELAR (Universidad de la República) e INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) con la Facultad de Agronomía de ese país. A partir de estos convenios, se están llevando a cabo distintos ensayos experimentales en diferentes departamentos del país y evaluando el comportamiento de diversos materiales genéticos de sorgo dulce (IICA Uruguay).

Paraguay ha realizado investigaciones en la producción de etanol de sorgo dulce. Se reporta una producción de 80-100 t de masa verde en dos cortes en un período de 5 meses, variando la producción de etanol en el orden de los 50 litros por tonelada (l/t), en dependencia de la variedad seleccionada. Obtienen de 5000 a 7000 litros de etanol por hectárea (l etanol/ha). Los resultados alcanzados abren un panorama alentador para la producción alternativa de alto rendimiento.

En la Argentina, particularmente en la región del noroeste, y teniendo como antecedentes los trabajos realizados en las décadas de 1970 y 1980 en el programaalconafta, la EEAOC restableció el programa BIOENERGÍA en el año 2006 y creó el Proyecto "Cultivos Energéticos", priorizando el desarrollo agroindustrial del sorgo azucarado y fibroso, incluyendo evaluaciones tecno-económicas, energéticas y de impacto ambiental. Se llevaron adelante estudios experimentales que incluyeron la detección de materiales genéticos, adaptación del manejo agronómico y del procesamiento fabril como otros aspectos logísticos y económicos, lo que permitió generar la información básica necesaria para iniciar pruebas de escalamiento comercial.

Potencial del sorgo azucarado para su inclusión en la cadena de producción de bioenergía

Para determinar la posible inclusión del sorgo azucarado en la cadena de producción de la caña de azúcar para la obtención de energía, se deben analizar tres factores: el proceso de producción, el potencial del sorgo como materia prima energética y la disponibilidad de tierra para su cultivo. A continuación se presentan cada uno de estos factores.

Proceso de producción de etanol a partir de sorgo dulce

Como en la mayoría de los sistemas de producción agrícola, la industria de la caña de azúcar es estacional, con una duración del período de cosecha del cultivo de aproximadamente 7 meses al año. Fuera de este período los ingenios azucareros, como así también toda la infraestructura relacionada con el mismo (cosecha, transporte, etc.) permanecen ociosos o se desmantela para realizar mantenimiento para el siguiente período de producción.

Esta situación genera una gran oportunidad para que el sorgo sea procesado durante ese tiempo. La infraestructura ya existente de cosecha de caña de azúcar y de fabricación de etanol a partir de la misma puede ser aprovechada por el sorgo provocando de esta forma un incremento en la eficiencia de la producción, del uso de la tierra, de la mano de obra y de otros recursos, resultando en una extensión del período de procesamiento energético. La Figura 1 muestra cómo se puede usar el sorgo dulce para alcanzar este objetivo mediante la cosecha del mismo en los meses de marzo – mayo. Eventualmente, con mayores investigaciones acerca de las distintas variedades de sorgo, la cosecha podría realizarse desde diciembre, permitiendo la producción de bioenergía durante todo el año.

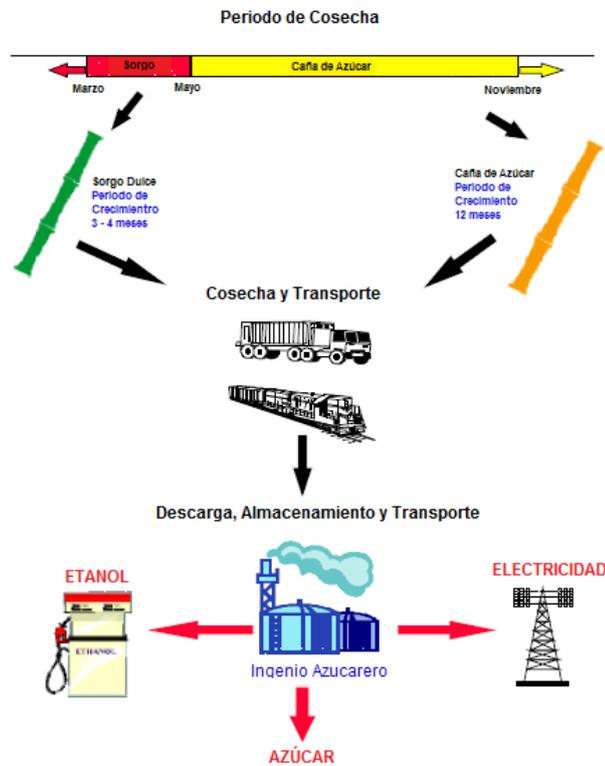


Figura 1: Integración del sorgo dulce con la caña de azúcar.

El procesamiento del sorgo dulce debe realizarse inmediatamente antes de la temporada de caña de azúcar de manera tal de evitar mayores trabajos de mantenimiento y reducir cualquier posible interrupción en la cosecha de la misma.

Al integrar el sorgo dulce en la cadena productiva de la caña de azúcar para la producción de etanol se mejorará tanto la eficiencia como la duración de la producción de bioenergía (Woods, 2000). La Figura 2 muestra las distintas posibilidades de procesamiento para la conversión de los azúcares del sorgo dulce en etanol. El camino 1 representa la fermentación directa del jugo en la planta de procesamiento. El camino 2 representa el proceso adecuado para el almacenamiento del jugo por pocos días. El camino 3 representa el procesamiento que debe seguirse para almacenar la materia prima durante mucho tiempo (Eggleston *et al.*, 2013).

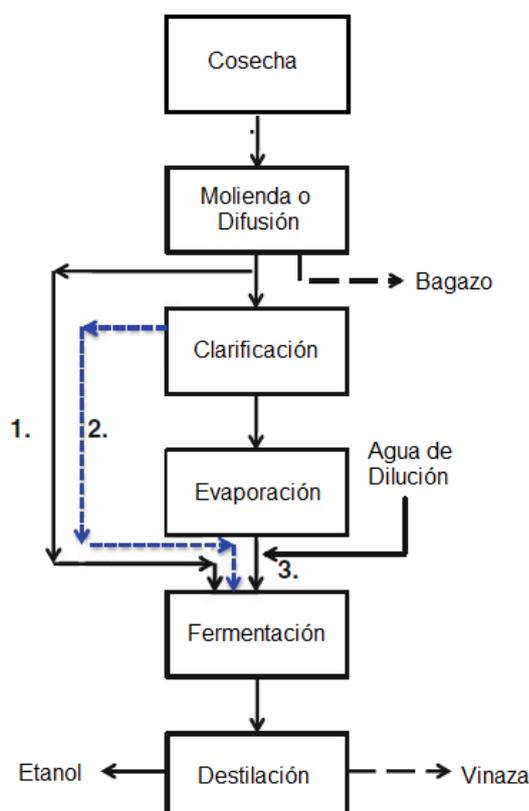


Figura 2: Distintos caminos de conversión de las azúcares presentes en el jugo de sorgo en etanol.

A continuación se describe brevemente cada etapa:

Cosecha

Los tallos de sorgo dulce pueden deteriorarse rápidamente luego de ser cosechados, especialmente cuando las temperaturas y la humedad del ambiente son relativamente altas. Una vez cortado el tallo es particularmente susceptible a infecciones microbianas. Si estos sorgos deteriorados son llevados y procesados en las biorefinerías el proceso podría verse afectado debido a las bajas concentraciones de azúcares disponibles para la fermentación. Además, podrían formarse productos como polisacáridos y ácidos orgánicos, cuyas propiedades afectarían también el proceso disminuyendo el rendimiento.

Por estas razones se hicieron estudios para determinar cuál podría ser el método de cosecha adecuado para mejorar la conservación del sorgo una vez

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

cosechado hasta la extracción del jugo, de manera tal de minimizar las pérdidas de azúcares fermentecibles y evitar la formación de productos indeseados. En este sentido, en el año 2012 Lingle *et. al.*, demostraron que la cosecha del tallo completo y la cosecha en trozos son más convenientes para los climas húmedos y calientes. Además, la cosecha en trozos de sorgo dulce con cosechadora combine (método usado generalmente para la caña de azúcar) resultó ser el mejor método, ya que maximiza la densidad del bulto durante el transporte de la misma forma que minimiza el deterioro. La longitud de los trozos como así también el tiempo entre la cosecha y el procesamiento se deben ajustar dependiendo del clima donde esté ubicado el establecimiento fabril.

Extracción del Jugo

Se han estudiado diferentes métodos de extracción para el jugo de sorgo. Uno de ellos, comúnmente aplicado para la caña de azúcar, utiliza molinos en serie para extraer el jugo de los tallos (trapiche). Este método no es muy eficiente para el caso de los sorgos dulces, obteniéndose recuperaciones de jugo por debajo del 50% (Whitfield *et al.*, 2012). Sin embargo, no existen estudios que establezcan el número de molinos adecuado para tener un buen rendimiento, como así tampoco existen aquellos que analicen el posible uso de agua en la extracción (como se usa con la caña de azúcar), por lo que los datos existentes para este método pueden no reflejar su real capacidad de extracción. Finalmente este método ofrece varias ventajas ya que, a pesar de que puede no ser tan efectivo para el sorgo como lo es para caña de azúcar, requiere una baja inversión de capital debido a que no se necesita realizar un pre tratamiento a los tallos, es un método sencillo y además los molinos ya están disponibles en los ingenios azucareros. Sin embargo, tal vez sea necesaria una regulación de los mismos para mejorar la extracción en el caso del sorgo.

Otro método estudiado para la extracción de jugo de sorgo fue la prensa hidráulica. En este caso, se obtuvieron recuperaciones de hasta 70%. Sin embargo, para obtener estos rendimientos, la alimentación debía ser muy baja lo cual puede ser un problema al utilizarlo a escala industrial (Eggleston, 2013).

Por último, otro método analizado fue a partir de difusores. Con este tipo de tecnología se obtienen rendimientos mucho mayores que con los anteriores métodos de extracción, sin embargo también aumenta la cantidad de impurezas extraídas en el

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

jugo, aunque esto en el caso del sorgo dulce no es un problema ya que lo que se quiere obtener son productos de fermentación y no azúcar. Más aún, esta situación podría representar una ventaja ya que con este método se podría obtener mayor cantidad de almidón, el cual podría hidrolizarse enzimáticamente mediante α -amilasa y glucoamilasa para obtener mayor cantidad de glucosa e incrementar el rendimiento fermentativo. Sin embargo, a pesar de que la operación y el mantenimiento de los difusores son mucho más sencillos que el de los otros métodos, los costos de instalación y operación son bastante superiores.

El residuo del proceso extractivo, cualquiera sea este, es el llamado bagazo. El bagazo de sorgo puede enviarse, como ocurre con el bagazo de caña, a las calderas para ser utilizado como combustible para la generación de vapor.

Se deben realizar mayores investigaciones para comparar las ventajas y desventajas técnicas y económicas para los diferentes métodos descriptos.

Clarificación

Una vez que el jugo ha sido extraído se procede a la clarificación. El objetivo de esta etapa es estabilizar el jugo y eliminar las partículas suspendidas. El grado de clarificación afecta a la transferencia de calor en los evaporadores, al rendimiento y a la calidad del producto final (Andrzejewski *et al.*, 2013). En general, un método óptimo de clarificación será aquel que requiera baja inversión con mínimos requerimientos de energía y que permita obtener buenos rendimientos de azúcares fermentecibles conservando otros importantes macro y micro nutrientes en el jugo final.

El método para la clarificación del jugo de sorgo se basa en el usado con la caña de azúcar pero con modificaciones que tienen que ver con las diferencias que existen entre uno y otro.

En primer lugar, el jugo de sorgo dulce se calienta para permitir la coagulación y formación de flóculos naturales de las partículas coloidales, particularmente proteínas. Luego se agrega a este jugo caliente, hidróxido de calcio en forma de lechada de cal para incrementar el pH hasta 6,3 – 6,5 lo cual permitirá (i) neutralizar los ácidos (ii) reducir la degradación de los azúcares reductores a ácidos orgánicos en los evaporadores (iii) formar flóculos de calcio y potasio (iv) introducir partículas cargadas positivamente en el jugo (Andrzejewski *et al.*, 2013). El calcio de la lechada y

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

el fósforo que se encuentra naturalmente en el jugo de sorgo son vitales para la formación de compuestos que ayudan en el proceso de floculación. A su vez, la floculación también se lleva a cabo con la ayuda de floculantes polianiónicos que aglomeran las partículas y agregan peso para aumentar las cantidades de impurezas sedimentadas. Esta etapa es importante también para eliminar impurezas del jugo y disminuir las incrustaciones en los evaporadores.

Evaporación

La concentración del jugo se realiza en evaporadores conectados en serie o paralelo, es decir, se realiza una evaporación múltiple efecto en la cual el vapor obtenido en el primer efecto se utiliza para calentar el segundo y así sucesivamente.

Es evidente que para que se produzca la evaporación de agua del jugo de sorgo, la temperatura en los evaporadores debe alcanzar valores cercanos a los 100°C. A estas temperaturas los azúcares pueden degradarse de acuerdo a la siguiente ecuación:



Si bien la degradación de la sacarosa a glucosa y fructosa no afecta los rendimientos de fermentación, si lo hace la degradación térmica de estos últimos a ácidos orgánicos, que son compuestos infermentescibles. Es por ello que la evaporación se debe realizar en vacío ya que de esta forma disminuye la temperatura de ebullición del jugo azucarado minimizando así las pérdidas de azúcares (Eggleston, 2013).

En definitiva, la evaporación del jugo de sorgo azucarado debe realizarse en vacío para mantener las temperaturas por debajo de los 65°C de manera tal de preservar los azúcares fermentescibles.

Fermentación

El punto de partida para la fermentación es la producción de una solución azucarada conocida como mosto. Como se explicó en un principio existen tres alternativas para obtener esta solución:

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

- Del jugo directamente extraído del tallo.
- Del jugo clarificado.
- Del jarabe obtenido luego de la evaporación.

A la cuba donde se realizará la fermentación ingresan dos corrientes, la primera es la alimentación que está constituida por alguna de las soluciones azucaradas nombradas anteriormente y agua en el caso de ser necesario alguna dilución para obtener la concentración de azúcares adecuada. La segunda corriente es la que proviene del pie de cuba o pre-fermentador. Ésta está formada por levaduras (*Saccharomyces Cerevisiae*), agua, nutrientes y ácido sulfúrico que se agrega hasta un pH de 2,5 – 3,0 para eliminar las posibles contaminaciones y activar las levaduras.

Una vez que ambas corrientes ingresan a la cuba se inicia el proceso de fermentación, cuya duración es de aproximadamente 10 hs. (proceso batch), de acuerdo al nivel de azúcares en la alimentación.

Durante la fermentación se obtiene CO_2 , el cual podría recuperarse si el sistema fuera cerrado. Al finalizar la misma, se obtiene el mosto final, que contiene el alcohol formado y levaduras. Este mosto final o vino pasa luego por una centrífuga donde se separa una crema de levaduras que se envía nuevamente al pie de cuba para ser tratada y reutilizada, y el vino se envía a destilería para continuar con el proceso de obtención de etanol.

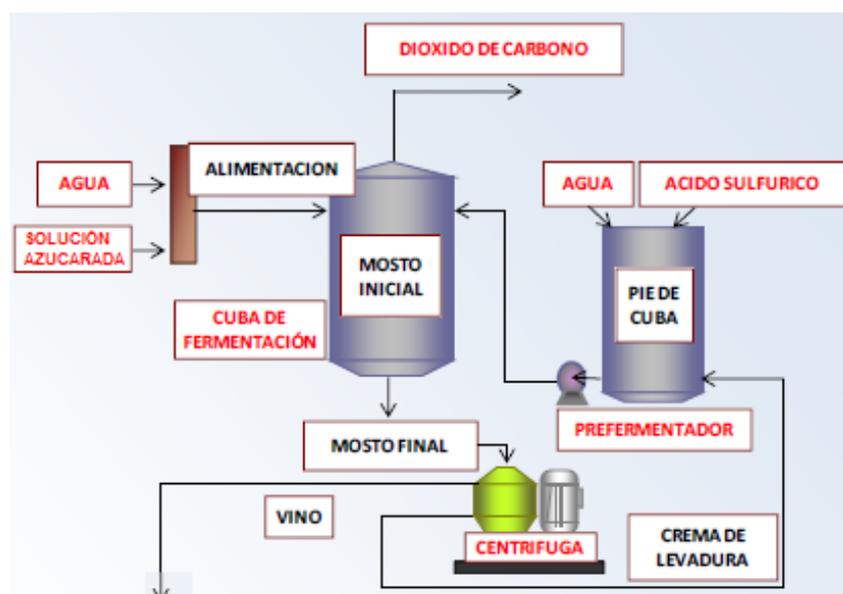


Figura 3: Fermentación de solución azucarada

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

Destilación

El vino de la etapa de fermentación se somete a un proceso de separación llamado destilación. Este proceso consiste en la separación de estos componentes por sus distintas temperaturas de ebullición.

En primer lugar el vino ingresa a una columna de destilación donde se separa la vinaza y un alcohol de bajo grado (50°GL aproximadamente). Luego, este alcohol de bajo grado ingresa en una columna depuradora en la cual se eliminan las impurezas de mayor temperatura de ebullición que el etanol obteniéndose el llamado “alcohol mal gusto”, por último, ingresa a una columna rectificadora, donde se obtiene alcohol de 96° GL.

Deshidratación

La mezcla azeotrópica alcohol – agua obtenida en la columna de rectificación se envía a una columna especial para eliminar el agua y obtener así un alcohol anhidro de 99,7 – 99,9° GL, el cual se almacena en tanques de acero para su posterior uso. Existen en la actualidad diversas tecnologías para realizar este proceso, entre ellas el empleo de tamices moleculares o membranas especiales.

Sorgo dulce como materia prima para bioenergía

En esta sección se analizará la aptitud bioenergética de híbridos de sorgo azucarado disponibles en el NOA para su potencial incorporación a la actividad sucro-alcoholera para la producción de bioetanol y energía eléctrica. Para ello se realiza un análisis de caracterización para el bagazo y el jugo y la determinación del poder fermentativo del jugo como así también la calidad del alcohol producido a partir de él.

En el caso de las variedades de sorgo dulce, los tallos maduros contienen alrededor del 73% de humedad y los sólidos se pueden dividir en carbohidratos estructurales y no estructurales (Chuck, 2011).

En el caso de los carbohidratos estructurales, el sorgo está compuesto principalmente por celulosa y hemicelulosa, los cuales a su vez pueden ser hidrolizados y usados como sustrato para la producción de etanol (Chuck – Hernández

et. al., 2011). En la Figura 4 se muestra la composición promedio de los tallos de sorgo dulce.

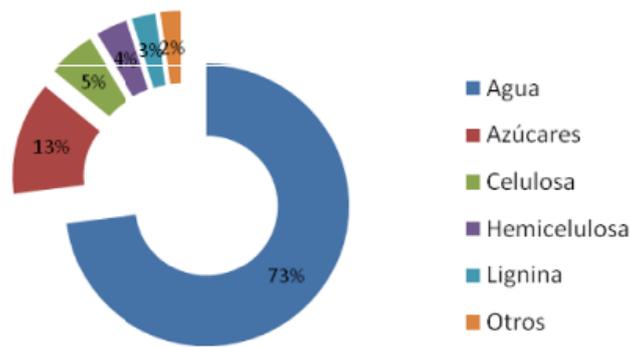


Figura 4: Composición química promedio de tallos de sorgo dulce (Chuck - Hernández *et. al.*, 2011).

En las Figuras 6 y 7 pueden verse los resultados obtenidos por De Boeck *et. al.* (2010), para el análisis de poder calorífico superior (PCS), cenizas y fibra, realizados en bagazos de diferentes híbridos de sorgo dulce existentes en la región del NOA. También se muestran dichos valores para bagazo de caña a modo comparativo.

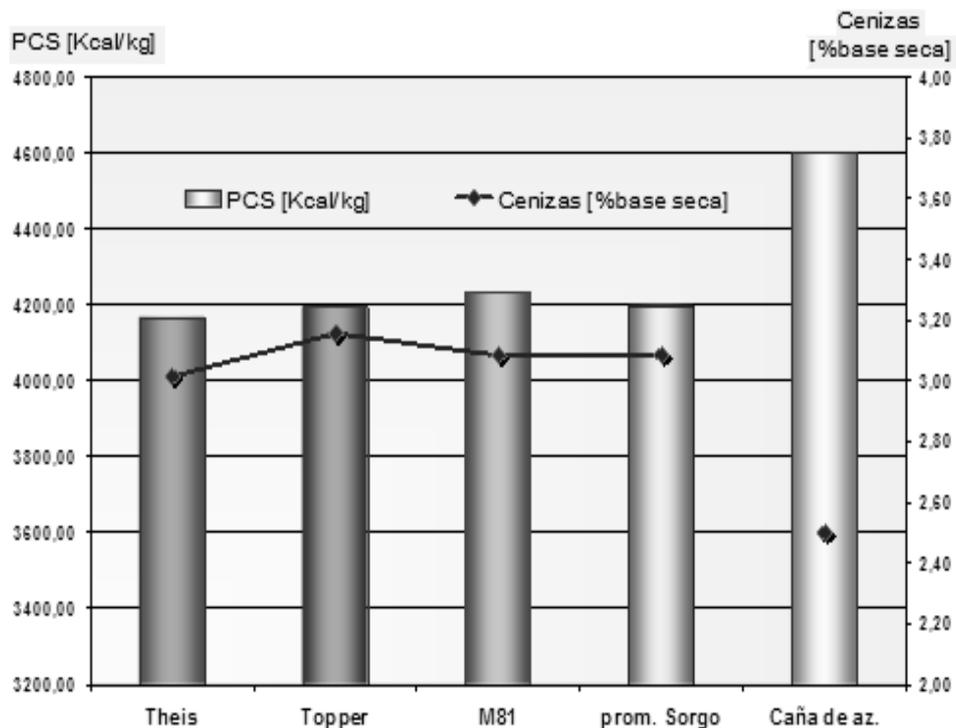


Figura 6: Valores comparativos de PCS y cenizas en diferentes híbridos de sorgo y caña de azúcar.

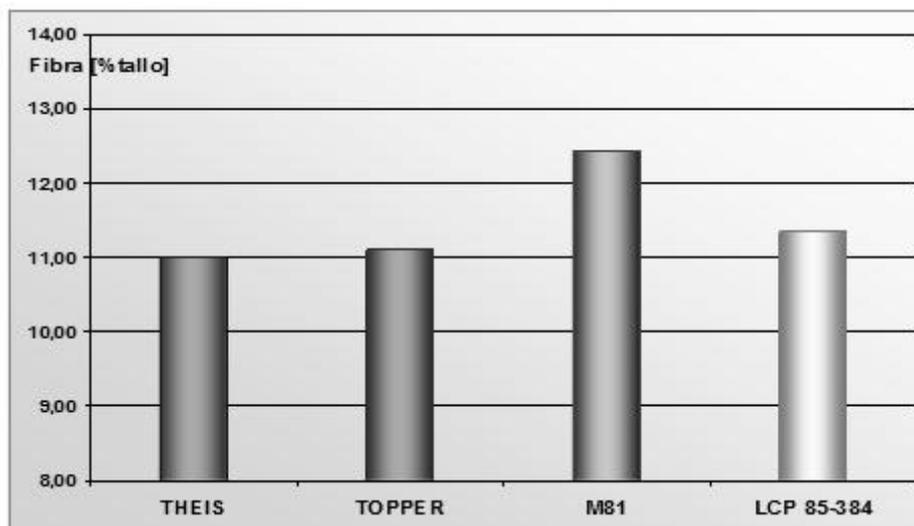


Figura 7: Valores comparativos de fibra en distintos híbridos de sorgo y variedad LCP 85-384 de caña de azúcar.

En las gráficas se puede observar que el sorgo presenta óptimas cualidades para ser utilizado como combustible en calderas bagaceras, con un poder calorífico superior (PCS) promedio de 4198 kcal/kg (17564 kJ/kg), que no difiere demasiado de los valores normales del bagazo de la caña de azúcar, y con un nivel promedio de cenizas de 3,1 (%base seca), algo superior al del bagazo de caña, pero dentro del rango aceptable para su combustión. Con estos resultados puede decirse que 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.

Por otro lado el jugo que se obtiene de los tallos está compuesto básicamente por sacarosa, glucosa y fructosa, en proporciones que dependen de la variedad, temporada de cosecha y etapa de madurez entre otros factores. En la Figura 8 se muestran los porcentajes de sacarosa, glucosa y fructosa determinados para sorgo, comparados con los mismos valores para caña de azúcar.

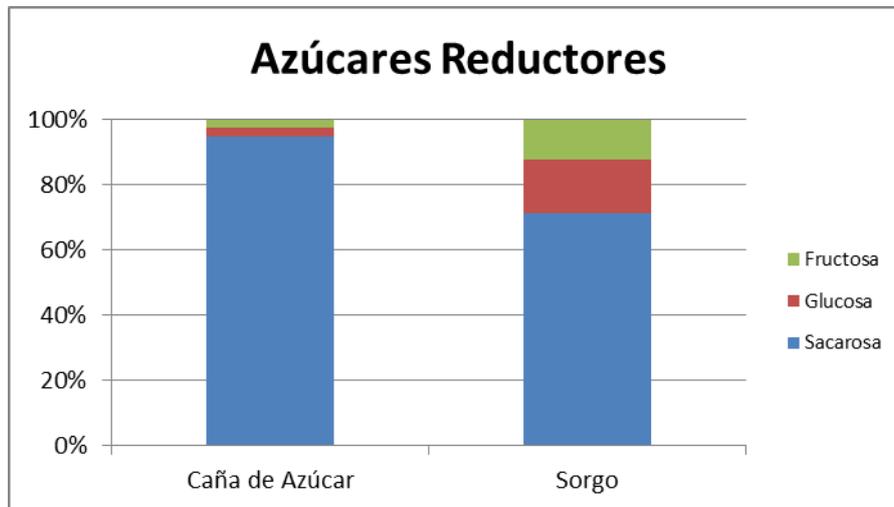


Figura 8: Porcentajes de sacarosa, glucosa y fructosa en sorgo dulce y caña de azúcar.

Si se compara la composición química del jugo de sorgo dulce con el jugo de caña de azúcar, el contenido de azúcares totales puede llegar a ser semejante, sin embargo en la caña, el porcentaje de sacarosa en relación a glucosa y fructosa es generalmente más alto (95% y 2% y 3% respectivamente).

De Boeck *et. al.* (2010) realizaron análisis de caracterización fisicoquímicos y de minerales presentes en jugo de sorgo y los compararon con los del jugo de caña de azúcar de manera tal de estimar el comportamiento durante la fermentación de los jugos. La Tabla 3 muestra los valores promedios medidos comparados con valores promedios para jugo de caña de azúcar.

Tabla 3: Valores promedios de caracterización fisicoquímica y de minerales presentes en los jugos de sorgo y caña.

DETERMINACION	Jugo de Sorgo azucarado	Jugo de Caña de azúcar
pH	5,41	5,45
Na [mg/kg]	55	150 - 170
K [mg/kg]	3000	2270 - 2290
Ca [mg/kg]	280	210 - 470
Mg [mg/kg]	88	120 - 140
Fe [mg/kg]	5,1	2 - 8
P [mgP ₂ O ₅ /ml]	252	200 - 600
Almidón [mg/kg °Brix]	9016	2831
Cenizas [%]	1,02	0,6 - 1,0

Teniendo en cuenta estos resultados, se llevaron a cabo cinéticas de fermentación para estimar el tiempo que requería la levadura *Saccharomyces Cerevisiae* para consumir los azúcares fermentescibles presentes en el jugo de sorgo crudo. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 9.

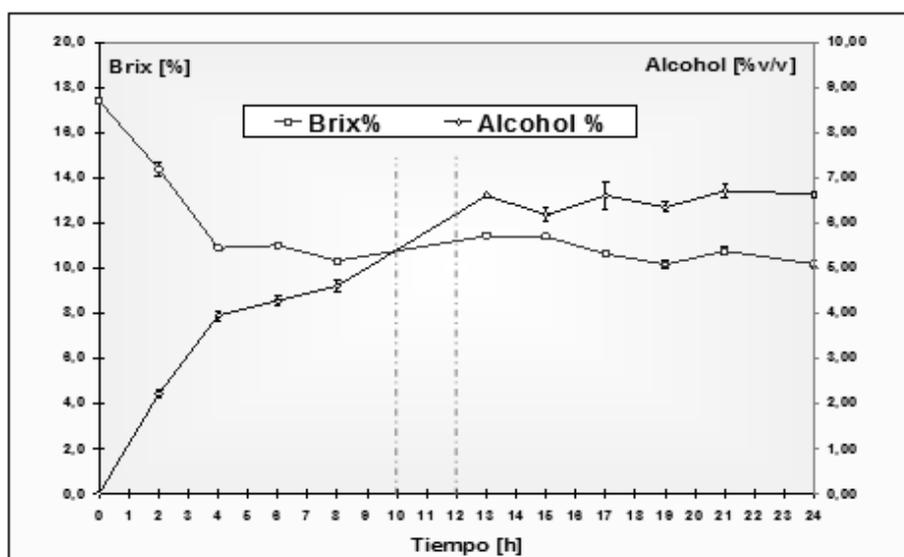


Figura 9: Cinética de fermentación de jugos de sorgo

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

Se puede observar que el tiempo requerido para que la fermentación llegue casi a su término es entre 10 y 12 hs, tiempo éste similar a los logrados en fermentaciones batch de jugos de caña de azúcar.

En la Tabla 3 se muestran las eficiencias fermentativas y productividad de distintos híbridos de sorgo dulce.

Tabla 3: Eficiencia fermentativa y productividad del sorgo.

Variedad	Brix [%]	AFT [g/g Jugo]	Fibra [%stlo]	Extracción [Kg _{juce} /Kg _{stlo}]	Eficiencia Fermentación [%]	Rendimiento Alcohólico [litro AFT]	Productividad [litro/ha/sorgo]
THEIS	16,2	14,4	11,00	0,73	86,54	56,04	58,9
TOPPER	17,2	16,4	11,10	0,76	84,6	54,8	68,3
M81	17,5	16,7	12,43	0,75	82,3	53,3	66,8

Se observan óptimos valores de eficiencias fermentativas lo que indica una buena adaptabilidad de la levadura a los nutrientes del jugo de sorgo.

Disponibilidad de territorio para cultivo del sorgo dulce

Los costos de transporte y la proximidad con las plantas de procesamiento y/o producción de bioenergía, juegan un rol determinante para establecer la rentabilidad de la producción de sorgo dulce (Vermerris, 2007).

En lo referente a las zonas aptas para la producción de sorgo azucarero en Tucumán y el NOA, se consideró las adyacencias a las áreas potencialmente aprovechables para producción de caña de azúcar, que pueden o no presentar problemas hídricos o de salinidad. Las zonas se demarcaron considerando una distancia máxima al ingenio azucarero no mayor a los 60 kilómetros, teniendo en cuenta que el costo del transporte es importante a la hora de calcular el costo total de producción de bioenergía.

Se consideraron lotes con monte o cultivos de granos posibles de ser integrados a un sistema de rotación con sorgo azucarero. Esto último se consideró ya que el sorgo azucarado constituye la gramínea ideal para rotar la soja en un sistema sustentable por sus niveles productivos, su estructura radicular y el volumen de

residuos remanentes de la cosecha, entre otros aspectos, aportando a la solución de una deficiencia importante de la cadena actual de producción de esta oleaginosa. La distancia mencionada determinó que sean involucradas localidades pertenecientes a las provincias de Santiago del Estero y Catamarca (Convenio EEAOC – PPE). En la Tabla 4 se muestran las áreas disponibles en ha.

Tabla 4: Posible área de expansión del cultivo de sorgo azucarado en Tucumán y área cercana.

Provincia	Monte (ha)	Desmonte (ha)	Total (ha)
Tucumán	103.710	182.220	285.930

En la Figura 10 se puede observar donde está localizado el territorio disponible para el cultivo de sorgo azucarero.

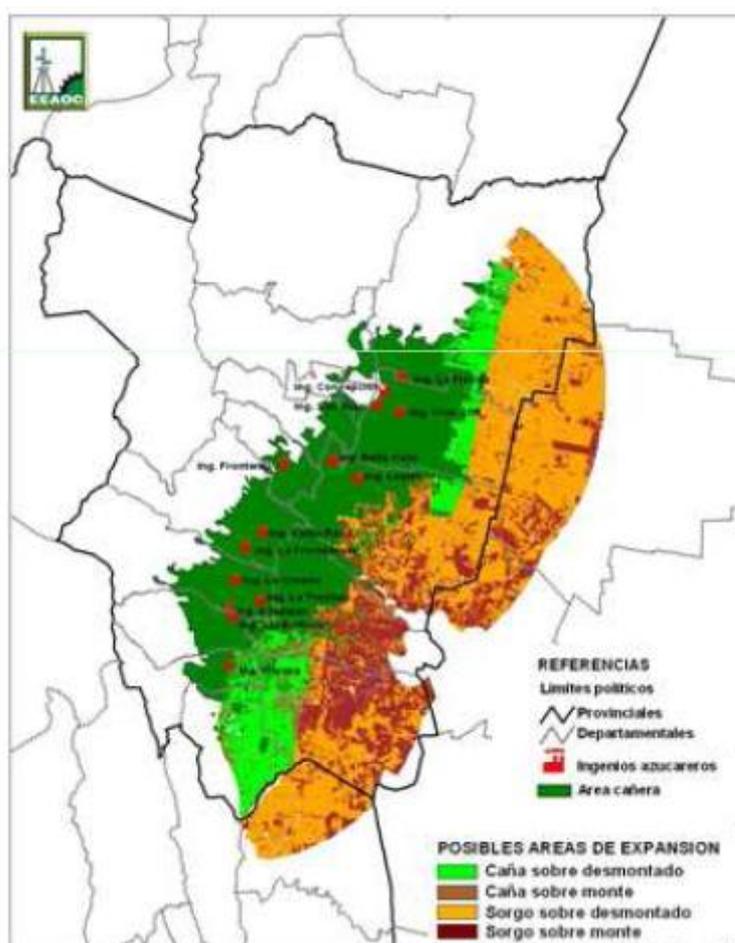


Figura10: Áreas potenciales de expansión de sorgo azucarero.

Conclusiones

Ante la actual crisis de energía por la que está atravesando el mundo se impone la necesidad de una reestructuración energética global que cambie significativamente los patrones vigentes de generación y consumo de energía y que promueva el desarrollo sostenible a partir de fuentes de energía renovable.

El sorgo dulce, perteneciente a los cultivos tipo C4 de alta eficiencia fotosintética y alta productividad, tiene un elevado potencial para la producción de biocombustibles (bioetanol y bioelectricidad) por su tenor de fibra similar al de la caña de azúcar (11-13%) y el elevado contenido de azúcares fermentecibles en el jugo de sus tallos, compuesto principalmente de sacarosa (70 - 80%), fructosa y glucosa.

Tucumán y el NOA poseen condiciones agroecológicas adecuadas para la producción de biomasa y bioenergía a partir del aprovechamiento integral del sorgo azucarado, lo cual constituye una ventaja a la hora de atender la creciente demanda de energía en nuestro país.

El sorgo azucarado constituye el cultivo complementario ideal a la caña de azúcar ya que puede integrarse a la misma cadena productiva por la similitud de sus cultivos, de los procesos de producción, sus elevadas eficiencias energéticas y su bajo impacto ambiental.

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

La integración puede realizarse haciendo uso de la infraestructura disponible para la caña de azúcar (cultivo, cosecha, transporte, molienda, fermentación, destilación, etc.) con lo cual se reducen los costos de producción.

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

Bibliografía consultada

- Andrzejewski, B., G. Eggleston, S. Lingle, and R. Powell. 2013a. Development of a sweet sorghum juice clarification method in the manufacture of industrial feedstocks for value-added products. *Industrial Crops and Products*. 44: 77–87.
- Cárdenas, G.J. 2014. Apuntes de clases de la asignatura “Introducción a la Bioenergía” (Especialización en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).
- Chuck, C. 2011. Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10. N°3.
- De Boeck. 2010. Aptitud bioenergética de variedades de sorgo azucarado. Presentado en el 1er Simposio de Sorgo – AIANBA. Pergamino Buenos Aires.
- Eggleston, G. 2013. New Commercially Viable Processing Technologies for the Production of Sugar Feedstocks from Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) for Manufacture of Biofuels and Bioproducts. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/257780704_New_Commercially_Viable_Processing_Technologies_for_the_Production_of_Sugar_Feedstocks_from_Sweet_Sorghum_Sorghum_bicolor_L_Moench_for_Manufacture_of_Biofuels_and_Bioproducts. Consultado el día 1 de septiembre de 2018.
- Ganduglia, Federico. 2009. Manual de Biocombustibles. Arpel IICA. Disponible en http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_AR_PEL_IICA.pdf. Consultado el día 17 de julio de 2018.
- ICRISAT. (2011). Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Disponible en: <http://www.icrisat.org/crop-sorghumgenebank.htm>. Consultado el día 10 de Julio de 2018.
- Informe anual de BP, “BP Statistical Review Año 2017”. Disponible en https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/es_es/spain/documents/downloads/PDF/ULTIMA_INFOGRAFIA_INFORME_BP_SR17.pdf.
- Lingle, S., T. Tew, H. Rukavina, and D. Boykin. 2012. Post-harvest changes in sweet sorghum I: Brix and sugars. *Bioenergy Research* 5: 158–167.

Trabajo Final Integrador de la carrera

“Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán– Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Norma Eliana Soledad Medina

- Ministerio de Energía y Minería de la Nación. Matriz energética Argentina 2016. Disponible en <http://rumboenergetico.com/balance-energetico-nacional-y-las-renovables/>. Consultado el día 25 de Junio de 2018.
- Oklahoma State University (OSU). 2006. Converting Sweet Sorghum into Ethanol. Disponible en <https://news.okstate.edu/articles/communications/2006/convertng-sweet-sorghum-ethanol.html>. Consultado el día 28 de Agosto de 2018.
- Romero, E. 2012. Integración del sorgo azucarado a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina. Revista Avance Agroindustrial Nº33 (1).
- Saballos, A. 2008. Development and Utilization of Sorghum as a Bioenergy Crop”. En: Genetic Improvement of Bioenergy Crops. Springer. USA.
- Serna Saldívar, S. 2010. Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Vermerris, W. 2007. Production of biofuel crops in Florida: Sweet Sorghum. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Anoop_Srivastava7/post/Agronomy_aspects_of_energy_plantations/attachment/59d6558f79197b80779acb04/AS%3A526139782123520%401502452907838/download/AG29800.pdf. Consultado el día 3 de Julio de 2018.
- Whitfield, M.B., M.S. Chinn, and M.W. Veal. 2012. Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products. Industrial Crops and Products 37: 362–375
- Woods, J. 2000. Integrating Sweet Sorghum and Sugarcane for Bioenergy: Modelling The Potential for Electricity and Ethanol Production in SE Zimbabwe. Disponible en <http://www.sorghum.silvaeculture.co.uk/thesis/Intro+ch1.pdf>