

EVALUACION DE VARIETADES DE SORGO DULCE (*Sorghum bicolor* L.) PARA LA PRODUCCION DE ETANOL

Carlos Rolz Asturias¹, Rolando Cifuentes², Roberto De León¹ & Fabiola Prado de Mico³

¹Investigadores del Centro de Ingeniería Bioquímica -CIB, ²Investigador del Centro de Estudios Agrícolas y Forestales -CEAF e ³Investigador asociado del CIB, Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala

Resumen

El sorgo dulce es una materia prima de doble propósito ya que se puede producir etanol de los azúcares que acumula en el tallo y además se cosecha el grano para alimentación humana o animal. El trabajo realizado informa de los rendimientos de campo y de la transformación de los azúcares en etanol de seis variedades de sorgo dulce. Se hace una comparación de estos indicadores con información similar obtenida de otras regiones y se concluye que es necesario optimizar todavía la producción en el campo así como el rendimiento de etanol. Sin embargo, de estas experiencias es posible proyectar dos cosechas en el año y bajo dicha suposición la producción de etanol en litros por hectárea cultivada por año asemeja a la cifra obtenida comercialmente con la caña de azúcar.

Palabras clave: sorgo dulce, etanol, rendimientos.

Summary

Sweet sorghums are a class of sorghum that accumulates high levels of sugar in the stalk of the plant. Hence, sweet sorghum can be described as a double-purpose crop, producing grain for human or animal food and ethanol from the sugars in the stalk. The present work reports production yields obtained in the field and the sugar transformation into ethanol for six sweet sorghum varieties. The data is compared with literature values and it is concluded that further work is required to optimize the process. However, from the data, two possible crops per year are feasible and this fact makes the figure of liters of ethanol per hectare per year similar to the one obtained commercially for sugar cane.

Key words: sweet sorghum, ethanol, yields.

Introducción

El sorgo dulce es una planta de la familia de las gramíneas que pertenece al género *Sorghum bicolor* L. Moench, el cual incluye también al sorgo común o maicillo como frecuentemente se le denomina en Guatemala. El sorgo dulce se diferencia de las otras variedades de sorgo, por la acumulación en el tallo de azúcares durante el desarrollo y maduración, en forma similar a lo que se observa en la caña de azúcar. Es adaptable a diferentes climas y latitudes y su cultivo toma alrededor de 140 días, dependiendo de la variedad. El sorgo dulce se cultiva actualmente en EEUU y en Asia, especialmente en China; el grano se emplea en la industria de concentrados para aves y de los azúcares del tallo se obtienen mieles para consumo humano.

Se ha logrado el desarrollo de híbridos que producen alrededor de 25 toneladas de material vegetal en base seca por hectárea. Esta productividad depende de la tasa de fertilización en donde se ha encontrado que la incorporación de 140 Kg. de nitrógeno por hectárea es adecuada (Rooney et al. 2007). Los principales azúcares solubles en el jugo extraído del tallo son la sacarosa, la glucosa y la fructosa que oscilan entre 30 y 47 % en base seca, de acuerdo a la variedad y a la técnica del cultivo (Billa et al. 1997; Dolciotti et al. 1998; Antonopoulou et al. 2008; Tew et al. 2008; Zhao et al. 2009). Los contenidos de hemicelulosa y celulosa insoluble varían igualmente y pueden estar entre 22 y 50 %.

Los carbohidratos solubles son fácilmente transformados en etanol por levaduras del género *Saccharomyces cerevisiae*. Varios artículos recientes muestran resultados de la producción



de etanol del jugo extraído de los tallos del sorgo dulce (de Mancilha et al. 1984; Lezinou et al. 1994; Mamma et al. 1995,1996; Bvochora et al. 2000; Laopaibonn et al. 2007; Yu et al. 2007; Liu et al. 2008; Liu & Shen, 2008). También, se ha experimentado con la técnica de extracción y fermentación simultánea en diferentes sistemas (Kargi & Cume, 1985; Kargi et al. 1985; Gibbons et al, 1986; Bryan, 1990; Sree et al. 1999; Yu et al, 2008; Shen & Liu, 2009). En todos estos experimentos el rendimiento de etanol ha sido adecuado. Finalmente, se han publicado estudios relacionados con el análisis energético del proceso (Worley et al. 1992), el diseño de plantas de escala industrial (Gnansounou et al. 2005; Wang & Liu, 2009) y aspectos generales (Karp & Shield, 2008; Sarath et al. 2008).



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Pruebas de campo

Se obtuvo semilla de seis variedades de sorgo dulce disponibles en la Universidad de Kentucky. Se llevaron a cabo tres ensayos en el campo agrícola del Campus Sur de UVG en Santa Lucía Cotzumalguapa. El primer ensayo realizado a campo abierto se inició el 26 de marzo, cuando se llevó a cabo la siembra, hasta el 21 de julio del 2009, cuando se obtuvo la colecta del material vegetal. El diseño experimental fue de bloques al azar con repeticiones y la unidad experimental consistió de cuatro surcos de 4 metros de largo separados por 1 metro entre surcos. Se plantaron de 8 a 10 semillas por postura con una distancia entre posturas de aproximadamente 25 cm. A las tres semanas, se efectuó un raleo dejando dos plantitas por postura (ver foto). El segundo y tercer ensayo se realizó en la casa de malla disponible en dicho campo, con el principal objeto de propagar semilla y por lo tanto sin réplicas. El segundo ensayo se realizó del 18 de noviembre de 2009 al 2 de marzo del 2010. El tercero, del 29 de marzo al 13 de julio del 2010. En ambos ensayos se sembraron tres surcos con dos variedades por surco.



En las tres pruebas se siguió el siguiente protocolo. A las dos semanas de la siembra se aplicaron 260 Kg. por hectárea de la fórmula fertilizante 15-15-15, correspondiente a una aplicación de 39 Kg. de N, 39 Kg. de P₂O₅ y 39 Kg. de K₂O. Aproximadamente a los 30 días siguientes se aplicó urea con un aporte de 40 Kg. de N por hectárea (ver foto). Se repitió la misma adición de urea al mes siguiente.



El control de plagas se orientó principalmente a contrarrestar el daño causado por hongos al tallo y a las hojas (ver fotos). Las aspersiones de fungicida se realizaron cada dos a tres semanas. Además se hicieron aspersiones eventuales de insecticidas para el control de insectos.

La foto muestra el daño causado por gusano cogollero (*Heliothis zea*) en la hoja de algunas variedades.



El material se cosechó al madurar el grano en la panoja. Se cuantificó el peso húmedo de tallo, hojas y panoja. Una muestra de los tallos se trasladó al campo central de la UVG en donde se guardaron congelados a -10 °C. Las fotos muestran las plantas de las variedades al cosechar.

Sugar drip



Umbrella



Top 26-6



Della



M 81 E



Dale





En la primera prueba se tuvo problemas con vientos fuertes que botaron parte de las plantas un día antes de cosecharlas como se aprecia en la foto. Los tallos no se quebraron.



Otro problema no previsto fue el daño por aves. El mismo inició durante la etapa de formación y desarrollo del grano, mermando así la producción de éste. El daño fue general para todas las variedades. La foto presenta un ejemplo de daño por pájaro.

Ensayos de fermentación

Los tallos se descongelaron, se partieron en segmentos empleando una pequeña sierra de mano y luego se pulverizaron en un molino de laboratorio (IKA Works A11). El tamaño de partícula logrado se observa en la foto en donde se aprecia la presencia de listones de cáscara.



La humedad de la caña molida se obtuvo procediendo de la manera tradicional en la forma siguiente: se pesaron dos gramos de material fresco en un recipiente de vidrio de peso conocido; luego se colocaron en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 65 °C hasta peso constante, el cual se logró entre las 24 a las 36 horas. El azúcar total se determinó por el método colorimétrico del fenol-sulfúrico empleando un espectrofotómetro (*Shimadzu modelo mini UV 1240*), procediéndose de la manera siguiente. A la totalidad de los sólidos secos en donde se determinó la humedad, se les agregó agua hirviendo. Se dejó enfriar por varias horas y luego se almacenó en la refrigeradora a 12 °C por 24 horas. Luego se filtró en papel filtro (*Whatman 1004-110*) y el total del volumen filtrado se llevó a 250 mL. Una alícuota se centrifugó a 10 °C y 4,000 rpm. y un mL se llevó a un volumen de 1000 mL. Finalmente, un volumen de esta dilución se llevó a una dilución apropiada para obtener una lectura confiable en el espectrofotómetro con el objeto de cuantificar los azúcares totales. Las lecturas se hicieron por duplicado. Para la cuantificación se empleó el modelo de una regresión lineal, obtenido previamente entre la densidad óptica y la concentración de soluciones patrón de sacarosa grado reactivo. El modelo se elaboró cada vez que se realizaba un conjunto de pruebas.

Se emplearon tres levaduras en los ensayos de producción de etanol. Estas eran *Saccharomyces cerevisiae* CBS 400, CBS 422 y CBS 459.¹

Para la preparación de los inóculos se sembró la cepa de levadura en un frasco con 30 g/L del medio de *Caldo Sabouraud* y 2 % glucosa, más un 1 % de

sacarosa adicional. El cultivo se realizó en agitación por 48 horas a 27 °C. El contenido de los frascos se centrifugó a 10 °C y 4,000 rpm. La biomasa recuperada se lavó una vez con agua. Se llevó a un volumen conocido con agua destilada. Una alícuota sirvió para determinar la cantidad de levadura seca en la suspensión, colocándola en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 65 °C hasta peso constante, el resto se agregó a un frasco de 250 mL en donde previamente se había pesado una cantidad apropiada de sorgo molido. Puede observarse en las fotos que la proporción de agua a sólidos empleada, aseguraba que el líquido cubriera las partículas. Debido a la liberación de CO₂ en forma de burbujas durante la fermentación era común encontrar partículas pegadas en la pared interna del frasco arriba de la interfase las cuales se incorporaban al medio manualmente en forma periódica.

Los frascos se incubaron en condiciones estáticas (*Lab Companion SI-600*) por 72 horas a 27 °C para asegurar una utilización completa de los azúcares. El contenido de los frascos se filtró en papel filtro (*Whatman 1004-110*) y el total del volumen filtrado se llevó a 250 mL. Se centrifugó una alícuota a 10 °C y 4,000 rpm. En esta dilución se determinó el contenido de etanol, empleando un cromatógrafo *Agilent 6890N*, una columna *HP-Plot/Q* de 30 metros de largo, con un diámetro interno de 32 mm. Los azúcares individuales se determinaron en la misma alícuota empleando un cromatógrafo líquido de alta presión *Agilent 1100*, un detector de índice de refracción 1200, una columna *Zorbax NH₂* de 25 cm de longitud y 4.6 mm de diámetro interno, empleando acetronitrilo en agua (70-30) como solvente.



RESULTADOS

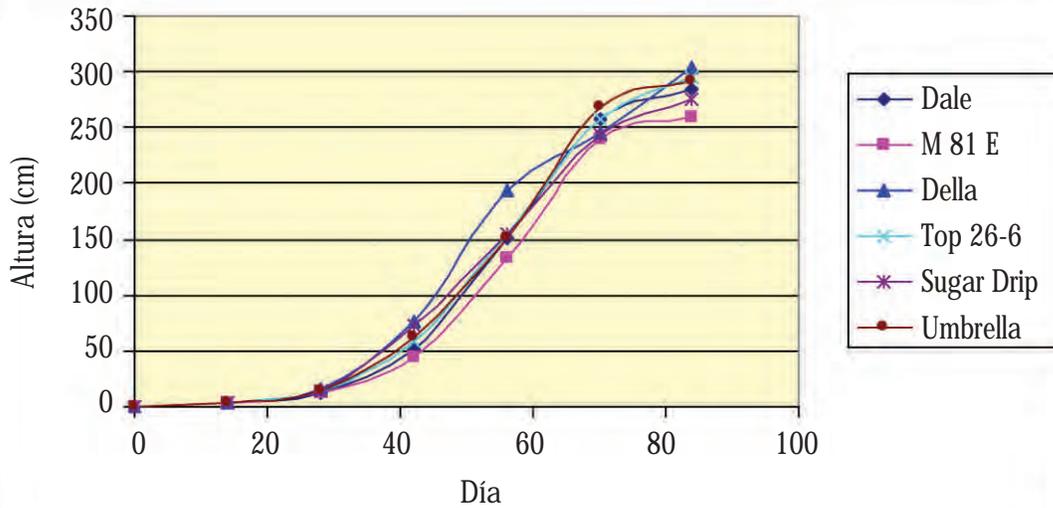
Pruebas de campo

La emergencia de las plántulas, en la primera prueba a campo abierto, tuvo lugar a los cinco días después de siembra. Se estimó un 95 a 100 % de emergencia. Se observó una tendencia de desarrollo y crecimiento similar a la mostrada por variedades criollas de sorgo común e igual para las seis variedades ensayadas (ver gráfica 1).

¹Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, The Netherlands

Gráfica 1.

Curvas de crecimiento de las seis variedades de sorgo dulce ensayadas en la prueba a campo abierto



La altura promedio y la desviación estándar observados en la primera prueba a campo abierto fueron de 2.85 ± 0.02 metros. El valor mínimo, variedad M81 E, fue de 2.59 metros y el máximo, variedad Della, 3.04 metros.

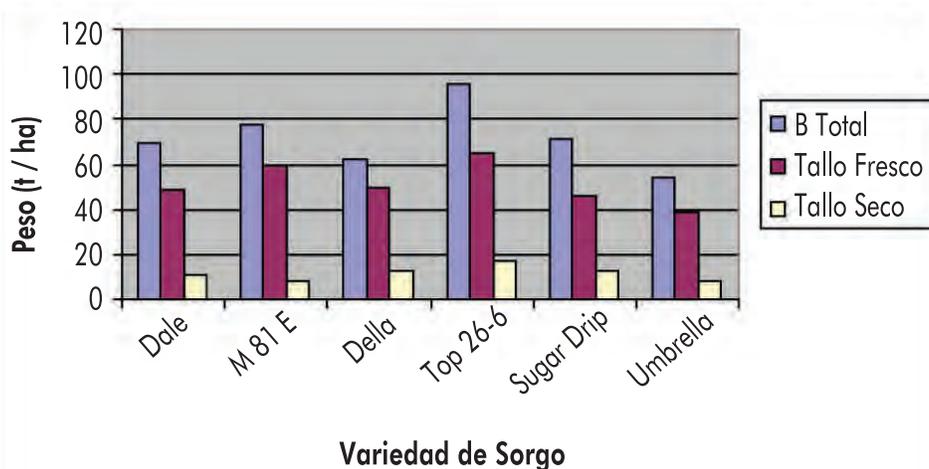
La producción media de materia verde y seca se presenta en el cuadro 1 y en la gráfica 2. La biomasa total (tallo + hojas) varió significativamente entre variedades ($p < 0.01$). El material con la mayor producción de materia verde fue la variedad Top 26 – 6 (95.9 t/ha). El resto de materiales fueron estadísticamente similares entre sí. La biomasa de tallo (fresco y seco) también varió entre variedades ($p < 0.05$). La variedad Top 26 – 6 produjo la mayor cantidad de biomasa. El resto de variedades fueron estadísticamente similares entre sí.

Aunque la relación de tallo fresco a la producción total de materia verde varió entre variedades, la diferencia no fue significativa ($p > 0.05$). En promedio, el tallo fresco contribuyó con el 72 % del valor de la biomasa fresca total.

Debido a problemas con vientos huracanados anteriormente mencionados, no se pudo esperar a que el grano de sorgo de algunas variedades llegara a su madurez. Únicamente se pudo colectar el grano de 4 de las 6 variedades. Las dos variedades que aún tenían el grano muy tierno fueron Dale y Top 26 – 6,

Gráfica 2.

Producción de biomasa vegetal de las seis variedades de sorgo dulce ensayadas en la prueba a campo abierto



ésta última fue un poco tardía en sus días a floración y la que resultó con la mayor producción de biomasa. Con base en el número de plantas cosechadas, se presenta un estimado de la producción de grano en el cuadro 1. En promedio se podría esperar una producción de 2.72 t de grano seco/ha.

Tomando en consideración el tiempo transcurrido desde la siembra al día en que se tuvo la cosecha adelantada (116 días) se estima que el ciclo de la mayor parte de variedades es de 120 días (4 meses), lo cual indica que eventualmente se podrían tener 3 ciclos de producción durante el año.

Cuadro 1. Producción de biomasa vegetal y grano de las seis variedades de sorgo dulce ensayadas en la prueba a campo abierto (resultados con igual letra son estadísticamente similares $p > 0.05$. ND significa que no se determinó por razones explicadas en el texto)

Variedad	Biomasa total (tallo completo + hojas) t/ha	Biomasa tallo fresco t/ha	Tallo fresco/Biomasa total	Grano seco t/ha
81E	78.0 ab	59.7 ab	0.76	2.64
Top 26-6	95.9 a	64.8 a	0.68	ND
Umbrella	54.0 b	39.0 b	0.73	2.85
Sugar Drip	70.9 ab	45.9 ab	0.65	3.27
Dale	69.3 ab	48.4 ab	0.70	ND
Della	62.4 b	49.5 ab	0.80	2.13

La humedad del tallo de las diferentes variedades se observa en el cuadro 2, en este caso, para las tres pruebas realizadas.

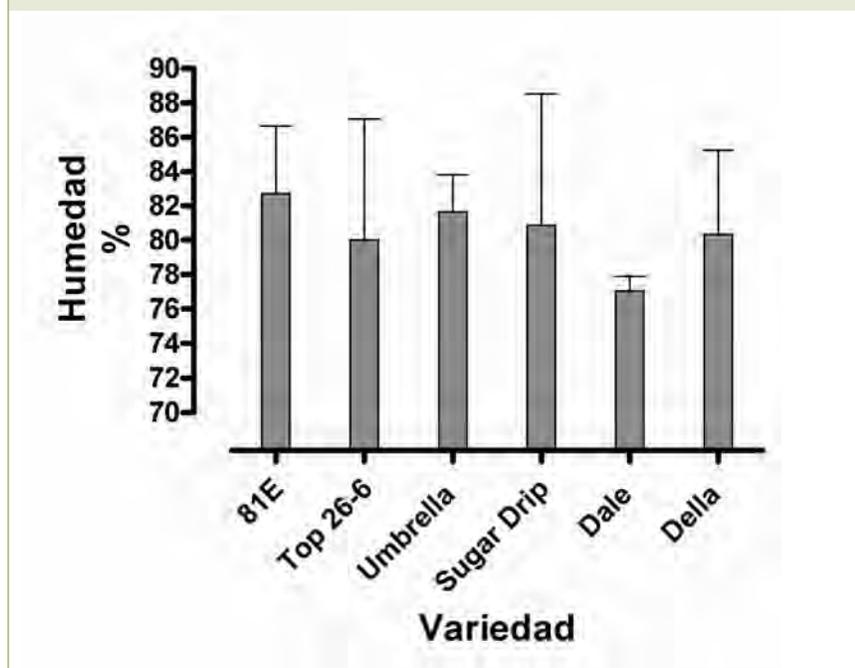
Cuadro 2. Datos experimentales de la humedad del tallo

Variedad	Prueba 1 03/09-07/09	Prueba 2 11/09-03/10	Prueba 3 03/10-07/09
	Humedad	Humedad	Humedad
	%	%	%
81E	86.24	83.53	78.60
Top 26-6	72.98	86.98	80.26
Umbrella	79.76	83.93	81.47
Sugar Drip	73.08	81.45	88.25
Dale	77.08	77.90	76.34
Della	75.15	84.74	81.29

El análisis de varianza al comparar los resultados en la primera prueba a campo abierto con el promedio de las pruebas dos y tres realizadas en casa de malla, indicó que no existía diferencia significativa de la humedad de las variedades en las tres pruebas realizadas ($p = 0.073$). La gráfica 3 muestra el promedio y la desviación estándar para cada variedad e ilustra la alta variación encontrada entre las muestras de los tres ensayos.

El contenido total de azúcares del tallo se observa en el cuadro 3 para las seis variedades, en dos de las pruebas, determinado por dos distintos métodos de análisis. En las dos últimas filas se han anotado las cifras correspondientes al promedio y a la desviación estándar de cada columna. De esta información es posible anotar las observaciones siguientes: a) la estimación obtenida por ambos métodos fue similar, b) el promedio de la primera prueba fue significativamente mayor que el de la segunda prueba ($p = 0.0253$), c) existe una variación entre las seis variedades, y d) en ambas pruebas las variedades Dale, Umbrella y Sugar Drip mostraron un mayor contenido de azúcar.

Gráfica 3. Promedio y desviación estándar de la humedad de las seis variedades ensayadas

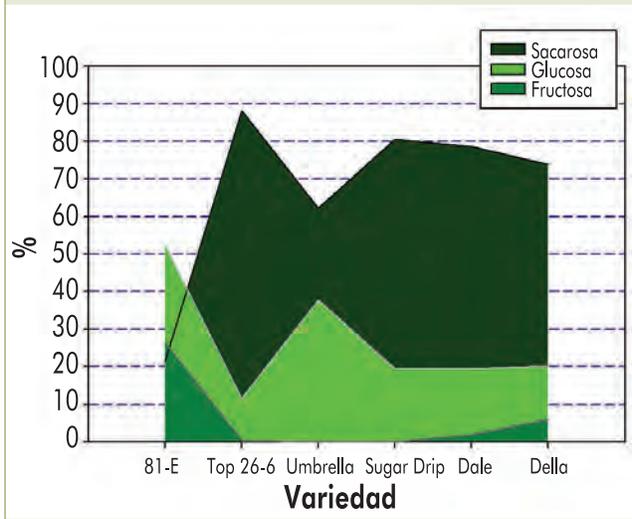


Cuadro 3: Datos experimentales del contenido de azúcares totales como % en base seca (FS: fenol-sulfúrico, HPLC: cromatografía líquida de alta presión)

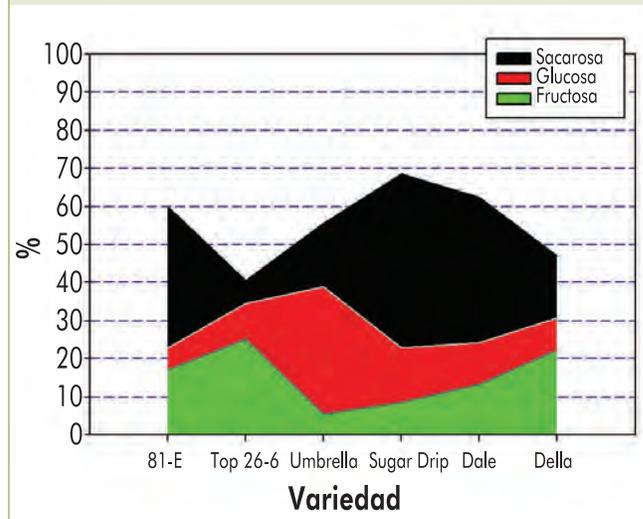
Variedad	Prueba 1 03/09-07/09	Prueba 1 03/09-07/09	Prueba 2 11/09-03/10	Prueba 2 11/09-03/10
	Azúcares	Azúcares	Azúcares	Azúcares
	FS	HPLC	FS	HPLC
81E	23.33	27.33	37.17	33.96
Top 26-6	42.02	48.48	25.36	25.26
Umbrella	51.05	54.76	32.39	36.72
Sugar Drip	46.93	51.05	47.34	46.44
Dale	56.51	50.61	42.87	43.52
Della	45.39	47.68	32.82	36.83
Promedio	44.21	46.65	36.32	37.12
Desviación estándar	11.38	9.78	7.91	7.46

En las gráficas 4 y 5 se ilustra la distribución de la sacarosa, la glucosa y la fructosa expresada en % del total de azúcares. La gráfica 4 contiene los datos de la primera prueba y la gráfica 5 los de la segunda prueba. En ambas gráficas se observa que la sacarosa fue el azúcar predominante, con excepción de la variedad 81-E en la primera prueba en donde fue la glucosa. La variedad Sugar Drip en ambas pruebas resultó con el mayor contenido de sacarosa. Por otro lado, la variedad Top 26-6 mostró resultados contrastantes, un contenido de sacarosa cerca del 90 % en la primera prueba, bajando cerca del 40 % en la segunda prueba. La fructosa fue el azúcar más bajo en todas las variedades, observándose un mayor contenido relativo en la segunda prueba. Además, las variedades 81-E y Top 26-6 mostraron el mayor contenido de fructosa. Finalmente, la variedad Umbrella en ambas pruebas tuvo la mayor proporción de glucosa.

Gráfica 4. Distribución de azúcares solubles en el material de la primera prueba



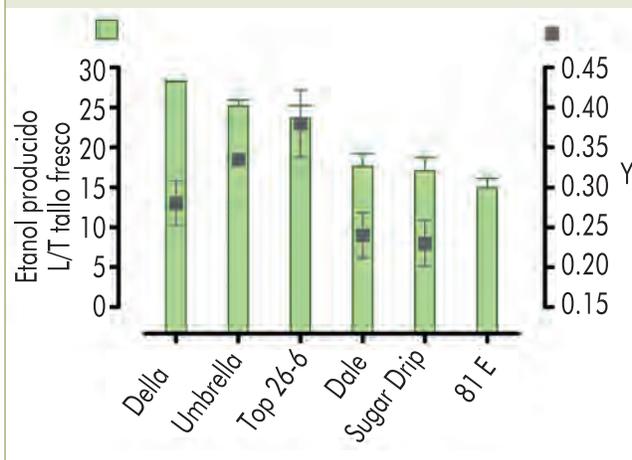
Gráfica 5. Distribución de azúcares solubles en el material de la segunda prueba



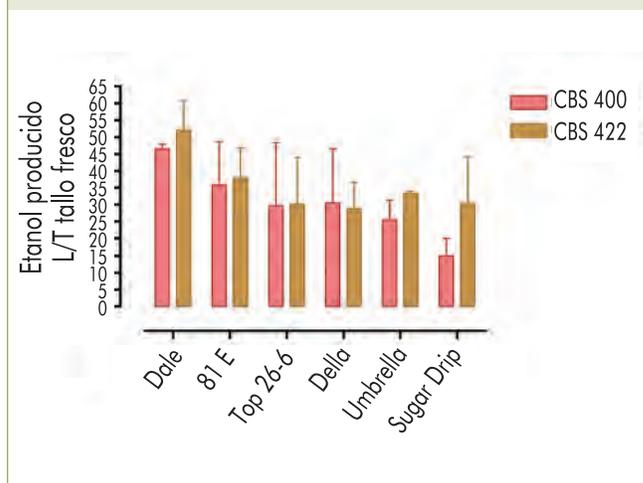
Pruebas de fermentación

Los datos experimentales de la producción de etanol con material de la primera prueba en campo abierto se muestran en la gráfica 6 expresados de la siguiente manera. En el eje vertical izquierdo se encuentran los litros de etanol producidos por tonelada de tallo fresco para las diferentes variedades de sorgo dulce. En el eje vertical derecho el rendimiento de la producción, gramos de etanol por gramo de azúcares totales consumidos durante el proceso. El rendimiento teórico en base a glucosa es de 0.51. Las mejores variedades fueron Della, Umbrella y Top26-6. Los valores de los rendimiento fueron relativamente bajos y la levadura CBS 459 únicamente consumió la mitad de los azúcares presentes.

Gráfica 6. Producción de etanol en litros por tonelada de tallo fresco con material de la primera prueba y el rendimiento en fracción respecto al azúcar consumido



Gráfica 7. Producción de etanol en litros por tonelada de tallo fresco con material de la segunda y tercera pruebas



La producción de etanol mejoró ostensiblemente al emplear materiales de la segunda y tercera pruebas y las levaduras CBS 400 y CBS 422 como se observa en la gráfica 7. En este caso las mejores variedades fueron Dale y 81-E.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el cuadro 4 se comparan los datos de rendimiento obtenidos e informados en el cuadro 1 y convertidos a base seca, con información similar obtenida en la consulta de la literatura pertinente. La comparación permite las conclusiones siguientes. Los 120 días de desarrollo obtenidos en nuestros ensayos están en la parte baja del intervalo reportado por otros investigadores. Sin embargo, se estima necesario determinar con más precisión el tiempo adecuado de cosecha, no necesariamente indicado por la madurez del grano cosechado, sino por el perfil de azúcares en el tallo que garantice una subsiguiente fermentación adecuada. Los rendimientos de material vegetal y de tallo obtenidos, aun con la mejor variedad identificada que fue la Top26-6, fueron relativamente bajos comparados con las cifras anotadas. Esto implica que es necesario optimizar la tasa de fertilización. Por el contrario, el rendimiento de grano obtenido fue comparable con los datos reportados por otros investigadores.

Cuadro 4: Comparación del rendimiento obtenido entre las seis variedades de sorgo dulce y datos similares obtenidos de la literatura

Variedad (País)	Tiempo de cosecha días	Biomasa seca (tallo completo + hojas) ton/ha	Biomasa tallo seco ton/ha	Grano ton/ha	Referencia
Varios (EEUU)		20.5	16.5		Smith et al 1987
Keller (España)	119	28.5	22.0		Curt et al 1995
Wray (Italia)		27.6	20.7	0.4	Dolciotti et al 1998
Híbridos (India)		29.7	11.1		Rajendran et al 2000
Varios (EEUU)			15.3-20.7		Hallam et al (2001)
Keller (Italia)	260	22.5	16.2	0.4	Amaducci et al 2004
Wray (Indonesia)	111		11.0	2.4	Tsuchihashi & Goto 2004
Keller (Indonesia)	111		10.7	2.3	Tsuchihashi & Goto 2004
Rio (Indonesia)	111		9.1	2.3	Tsuchihashi & Goto 2004
Keller (China)			17.3	2.8	Gnansounou et al 2005
Wray (China)			17.4	1.8	Gnansounou et al 2005
Rio (China)			16.6	3.4	Gnansounou et al 2005
Tianza No.2 (China)	140		18.2	5.0	Gnansounou et al 2005
Wray & Keller (Italia)	125	27.0			Barbanti et al 2006
Varios (EEUU)			15.8-18.0		Rooney et al (2007)
Dale (EEUU)	138		28.4		Tew et al (2008)
M81E (EEUU)	138		31.2		Tew et al (2008)
Rio (EEUU)	138		22.4		Tew et al (2008)
Theis (EEUU)	138		31.4		Tew et al (2008)
Topper (EEUU)	138		29.8		Tew et al (2008)
M81E (China)	164	29.8	20.2	3.0	Zhou et al 2009
CT2 (China)	140	29.8	20.2	4.7	Zhou et al 2009
LN3 (China)	161	29.8	20.2	4.2	Zhou et al 2009
M81E (EEUU)	159	24.4-26.3		1.4-2.1	Wu et al 2010
81E (Guatemala)	120	13.5	10.3	2.6	Este trabajo
Top 26-6 (Guatemala)	120	19.1	12.9	ND	Este trabajo
Umbrella (Guatemala)	120	9.9	7.1	2.8	Este trabajo
Sugar Drip (Guatemala)	120	13.5	8.8	3.3	Este trabajo
Dale (Guatemala)	120	15.9	11.1	ND	Este trabajo
Della (Guatemala)	120	12.2	9.7	2.1	Este trabajo

En el cuadro 5 se comparan el contenido de azúcar total en base seca y la distribución de los diferentes azúcares solubles obtenidos en este trabajo con información similar obtenida en la consulta de la literatura pertinente. La comparación permite las conclusiones siguientes. El contenido de azúcar total está entre los valores altos reportados. De hecho, dos variedades, *Umbrella* y *Dale* sobresalen. Sobre la distribución de los diferentes azúcares las conclusiones serían inciertas, debido, primero, a la variación existente de los datos consultados, y segundo, por la influencia del grado de madurez de la variedad al ser cosechada. Por otro lado, debe tomarse en cuenta en futuros ensayos que desde el punto de vista de la asimilación de los azúcares por la levadura, convendría tener un tallo con un bajo contenido de fructosa. O sea que sería conveniente emplear las variedades *Sugar Drip*, *Umbrella* y *Dale*.

Cuadro 5: Comparación de los azúcares entre las seis variedades de sorgo dulce y los datos similares obtenidos de la literatura

Variedad (País)	Azúcares solubles en el tallo % en base seca	Sacarosa % del total de azúcar	Glucosa % del total de azúcar	Fructosa % del total de azúcar	Referencia
Varios (India)		60.00	33.00	7.00	Mohite & SivaRaman 1984
Varios (EEUU)	47.6	70.87	14.73	14.40	Smith et al 1987
Keller (Grecia)		97.47	2.53	0.00	Christakopoulos et al 1993
Keller (España)	43.4	52.87	26.52	20.62	Curt et al 1995
Keller (Grecia)		87.34	12.66	0.00	Mamma et al 1996
Keller (Grecia)	72.45	27.55	0.00		
Mamma et al 1996					
Keller (Grecia)	86.61	13.39	0.00		
Mamma et al 1996					
Wray (Italia)	43.6	63.35	20.06	16.59	Dolciotti et al 1998
Híbridos (India)	40.2				Rajendran et al 2000
Keller (Italia)	36.7	64.85	22.34	12.81	Amaducci et al 2004
Dale (EEUU)	30.9				Tew et al (2008)
M81E (EEUU)	30.0				Tew et al (2008)
Rio (EEUU)	31.1				Tew et al (2008)
Theis (EEUU)	32.9				Tew et al (2008)
Topper (EEUU)	32.3				Tew et al (2008)
M81E (China)	47.6				Zhou et al 2009
CT2 (China)	47.6				Zhou et al 2009
LN3 (China)	47.6				Zhou et al 2009
M81E (EEUU)		70.00	20.00	10.00	Wu et al 2010
81E (Guatemala)	29.27	40.76	37.53	21.72	Este trabajo
Top 26-6 (Guatemala)	38.62	64.26	23.02	12.73	Este trabajo
Umbrella (Guatemala)	46.07	58.80	38.40	2.80	Este trabajo
Sugar Drip (Guatemala)	48.44	74.51	21.24	4.26	Este trabajo
Dale (Guatemala)	50.00	70.46	21.89	7.65	Este trabajo
Della (Guatemala)	41.96	60.29	25.53	14.19	Este trabajo

En el cuadro 6 se comparan las cifras del rendimiento y producción de etanol y el consumo de azúcares entre las seis variedades de sorgo dulce y los datos similares obtenidos de la literatura. Las referencias en el cuadro se dividieron de acuerdo a la manera de llevar a cabo la fermentación. Primero se presentan los trabajos consultados que emplearon jugo obtenido al prensar el tallo del sorgo dulce. Luego, aquellas referencias en donde se empleó alguna técnica empleando las partículas sólidas del tallo, en forma similar a la usada en este trabajo. La comparación permite las conclusiones siguientes. Los resultados obtenidos indican que la variedad Dale es con la que se logra la mayor cantidad de etanol producido por tonelada de tallo fresco. Sin embargo los indicadores de rendimiento y productividad de etanol están bajos comparados con lo obtenido por otros investigadores. De manera que es necesario realizar experimentos para optimizar la producción de etanol de sorgo dulce. Debe anotarse que en la literatura consultada la extracción del jugo por sistemas de prensa comunes en la industria de la caña de azúcar fue relativamente baja. Es por eso que se ha realizado trabajo en fermentar el tallo de sorgo dulce en partículas con la adición de la levadura y empleando diferentes estrategias y sistemas. Este hecho también debe ser tomado en cuenta en futuros experimentos.

Cuadro 6: Comparación del rendimiento de etanol y el consumo de azúcares entre las seis variedades de sorgo dulce y los datos similares obtenidos de la literatura

Levadura	Equipo y Datos	Tiempo h	Rendimiento % del teórico	Consumo azúcar % original	Producción etanol L/ton tallo fresco	Referencia
Colección	Jugo, frasco 30°C 150rpm	48	90.1-99.2			de-mancilha et al 1984
TISTR 5048 Thailand	Jugo, frasco 30°C estático	18	76.5-82.3	96.0		Laopaiboon et al 2007
Colección	Jugo, frasco 30°C 150rpm	48	87.9-94.9	87.7-94.8		Liu et al 2008
Comercial Ethanol Red	Jugo, frasco 30°C 150rpm	72	91.6-93.8	100.0		Wu et al 2010
NRRRL Y-11572	Sólidos, tambo rotatorio Ambiente	70	85.0	81.0	122.3	Kargi & Curme 1985
NRRRL Y-2034	Sólidos, tornillo continuo Ambiente	72	85.0		123.9	Gibbons et al 1986
Comercial UFC seca	Sólidos, tambos estáticos Ambiente		72.6-80.4			Bryan 1990
Comercial Panificación AF37X	Sólidos 37°C	48	91.0		101.9	Yu et al 2008
Comercial Angel	Sólidos 25-30 oC		53.0			Shen & Liu 2009
81E (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72			46.8	Este trabajo
Top 26-6 (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72	74.5		44.0	Este trabajo
Umbrella (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72	66.7		33.9	Este trabajo
Sugar Drip (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72	45.1		44.1	Este trabajo
Dale (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72	47.1		61.0	Este trabajo
Della (Guatemala)	Sólidos, frasco estático 27°C	72	54.9		36.5	Este trabajo

Cuadro 7: Estimaciones de la productividad

Variedad	Producción etanol L/ton tallo fresco	Producción de tallo fresco ton/ha	Producción etanol L/ha-año
81E	46.8	59.70	5588
Top 26-6	44.0	64.80	5702
Umbrella	33.9	39.00	2644
Sugar Drip	44.1	45.90	4048
Dale	61.0	48.40	5905
Della	36.5	49.50	3614
Caña de azúcar (Smeets et al 2008)	69	86	5934

Ahora bien, si se combina la producción de etanol por peso de tallo con la producción de tallo por area superficial y se estima en forma conservadora que pueden realizarse dos cosechas en el año, es posible llegar a las estimaciones anotadas en el cuadro 7 para las variedades de sorgo estudiadas. La cifra obtenida para las variedades Dale, Top 26-6 y 81E son comercialmente atractivas y asemejan las logradas empleando caña en Brazil (Smeets et al 2008).

BIBLIOGRAFÍA

Amaducci S, A Monti, G Venturi (2004) *Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques* Industrial Crops and Products **20**: 111-118

Antonopoulou G, HN Gavala, IV Skiadas, K. Angelopoulos, G. Lyberatos (2008) *Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass* Bioresource Technology **99**: 110-119

Barbanti L, S Grandi, A. Vecchi, G. Venturi (2006) *Sweet and fibre sorghum, energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads* Eur. J. Agronomy **25**: 30-39

Billa E, DP Koullas, B. Monties, EG Koukios (1997) *Structure and composition of sweet sorghum stalk components* Industrial Crops and Products **6**: 297-302

Bryan WL (1990) *Solid-state fermentation of sugars in sweet sorghum* Enzyme Microb. Technol. **12**: 437-442

Bvochora JM, JS Read, R Zvauya (2000) *Application of very high gravity technology to the cofermentation of sweet stem sorghum juice and sorghum grain* Industrial Crops and Products **11**: 11-17

Christakopoulos P, L-W Li, D. Kekos, BJ Macris (1993) *Direct conversion of sorghum carbohydrates to ethanol by a mixed microbial culture* Bioresource Technology **45**: 89-92

Curt MD, J Fernandez, M Martínez (1995) *Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) cv. Keller in relation to water regime* Biomass and Bioenergy **8**: 401-409

- de-Mancilha IM, AM Pearson, J. Waller, GJ Hogaboam (1984) *Increasing alcohol yield by selected yeast fermentation of sweet sorghum. I. Evaluation of yeast strains for ethanol production* *Biotechnology and Bioengineering* **26**: 632-634
- Dolciotti I, S Mambelli, S. Grandi, G. Venturi (1998) *Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production* *Industrial Crops and Products* **7**: 265-272
- Gibbons WR, CA Westby, TL Dobbs (1986) *Intermediate-Scale, Semicontinuous Solid-Phase Fermentation Process for Production of Fuel Ethanol from Sweet Sorghum* *Applied & Environmental Microbiology* **51**: 115-122
- Gnansounou E, A Dauriat, CE Wayman (2005) *Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China* *Bioresource Technology* **96**: 985-1002
- Hallam A, IC Anderson, D.R. Buxton (2001) *Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercropped for biomass production* *Biomass and Bioenergy* **21**: 407-424
- Kargi F, JA Curme (1985) *Solid-state fermentation of sweet sorghum to ethanol in a rotary-drum fermentor* *Biotechnology and Bioengineering* **27**: 1122-1125
- Karp A, I Shield (2008) *Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge* *New Phytologist* **179**: 15-32
- Laopaiboon L, P Thanonkeo, P. Jaisil, P. Laopaiboon (2007) *Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by Saccharomyces cerevisiae* *World J Microbiol Biotechnol* **23**: 1497-1501
- Lezinou V, P Christakopoulos, D. Kekos, BJ Macris (1994) *Simultaneous Saccharification and Fermentation Of Sweet Sorghum Carbohydrates to ethanol in a fed-batch process* *Biotechnol. Letters* **16**: 983-988
- Liu R, J Li, F. Shen (2008) *Refining bioethanol from stalk juice of sweet sorghum by immobilized yeast fermentation* *Renewable Energy* **33**: 1130-1135
- Liu R, F Shen (2008) *Impacts of main factors on bioethanol fermentation from stalk juice of sweet sorghum by immobilized Saccharomyces cerevisiae (CICC 1308)* *Bioresource Technology* **99**: 847-854
- Mamma D, P Christakopoulos, D. Koullas, D. Kekos, BJ Macris, E. Koukios (1995) *An Alternative Approach to the bioconversion of sweet sorghum carbohydrates to ethanol* *Biomass and Bioenergy* **8**: 99-103
- Mamma D, D Koullas, G. Fountoukidis, D. Kekos, BJ Macris, E. Koukios (1996) *Bioethanol from Sweet Sorghum: Simultaneous Saccharification and Fermentation of Carbohydrates by a Mixed Microbial Culture* *Process Biochemistry* **31**: 377-381
- Mohite U, H SivaRaman (1984) *Continuous conversion of sweet sorghum juice to ethanol using immobilized yeast cells* *Biotechnol Bioeng* **26**: 1126-1127
- Nguyen MH, RGH Prince (1996) *A simple rule for bioenergy conversion plant size optimization:: bioethanol from sugar cane and sweet sorghum* *Biomass and Bioenergy* **10**: 361-365
- Rajendran C, K Ramamoorthy, S. Backiyarani (2000) *Effect of Deheading on Juice Quality Characteristics and Sugar Yield of Sweet Sorghum* *J. Agronomy Crop Science* **185**: 23-26
- Rooney WL, J Blumenthal, B. Bean, JE Mullet (2007) *Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock* *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **1**: 147-157
- Sarath G, RB Mitchell, SE Sattler, D. Funnell, JF Pedersen, RA Graybosch, KP Vogel (2008) *Opportunities and roadblocks in utilizing forages and small grains for liquid fuels* *J Ind Microbiol Biotechnol* **35**: 343-354
- Shen F, R Liu (2009) *Research on Solid-State Ethanol Fermentation Using Dry Sweet Sorghum Stalk Particles with Active Dry Yeast* *Energy & Fuels* **23**: 519-525
- Smeets E, M Junginger, A Faaij, A Walter, P Dolzan, W Turkenburg (2008) *The sustainability of Brazilian ethanol. An Assessment of the possibilities of certain production* *Biomass Bioenergy* **32**: 781-813
- Smith GA, MO Bagby, RT Lewellan, DL Doney, PH Moore, FJ Hills, LG Campbell, GJ Hogaboam, GE Coe, K Freeman (1987) *Evaluation of Sweet Sorghum for Fermentable Sugar Production* *Potential Crop Sci* **27**(4): 788-793
- Sree NK, M Sridhar, L. Venkateswar Rao, A. Pandey (1999) *Ethanol production in solid substrate fermentation using thermotolerant yeast* *Process Biochemistry* **34**: 115-119
- Tew T, R Cobill, EP Richard (2008) *Evaluation of Sweet Sorghum and Sorghum _Sudangrass Hybrids as Feedstocks for Ethanol Production* *BioEnergy Research* **1**: 147-152
- Tsuchihashi N, Y Goto (2004) *Cultivation of sweet sorghum and determination of its harvest time to make us as the raw material for fermentation, practice during rainy season of dry land of Indonesia* *Plant Prod.Sci.* **7**: 442-448
- Wang F, C-Z Liu (2009) *Development of an Economic Refining Strategy of Sweet Sorghum in the Inner Mongolia Region of China* *Energy & Fuels* **23**: 4137-4142
- Worley JW, DH Vaughan, JS Cundiff (1992) *Energy analysis of ethanol production from sweet sorghum* *Bioresource Technology* **40**: 263-273
- Wu X, S Staggenborg, JL Propheter, WL Rooney, J Yu, D Wang (2010) *Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation* *Industrial Crops Products* **31**: 164-170
- Yu J, Z Xu, T Tan (2008) *Ethanol production by solid state fermentation of sweet sorghum using thermotolerant yeast strain* *Fuel Processing Technology* **89**: 1056-1059
- Yu J, X Zhang, Tan T (2007) *An novel immobilization method of Saccharomyces cerevisiae to sorghum bagasse for ethanol production* *Journal of Biotechnology* **129**: 415-420
- Zhao YL, A Dolat, Y Steinberger, X Wang, A Osman, GH Xie (2009) *Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel* *Field Crops Research* **111**: 55-64



(De izquierda a derecha)

Carlos Rolz
carlosrolz@uvgh.edu.gt

Rolando Cifuentes
rcifuen@uvg.edu.gt

Roberto De León
ldeleon@uvg.edu.gt

Fabián Prado de Micheo
fabimicheo@gmail.com