

Producción de biomasa y concentración de azúcares de dos variedades de sorgo dulce en la región Huasteca Tamaulipeca

Biomass production and sugar concentration in two sweet sorghum varieties in the Huasteca Tamaulipeca region

Juan VALADEZ GUTIÉRREZ ✉, **Julio César GARCÍA**, **Francisco ZAVALA GARCÍA** y **Luis Lázaro VALLE RODRÍGUEZ**

Campo Experimental Las Huastecas, Centro de Investigación Regional del Noreste (CIRNE), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Tampico-Mante Km 55, Villa Cuauhtémoc, Municipio de Altamira, Tamaulipas. C.P. 89610. México. E-mails: valadez.juan@inifap.gob.mx, garcia.juliocesar@inifap.gob.mx ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 30/07/2009 Fin de primer arbitraje: 16/11/2009 Primera revisión recibida: 12/12/2010 Aceptado: 03/01/2011

RESUMEN

Se evaluaron dos variedades de sorgo dulce en tres fechas de siembra, con la finalidad de conocer su potencial como materia prima para su aprovechamiento en la extracción de etanol. Los genotipos estudiados correspondieron a M81E, variedad introducida de la Universidad de Kentucky, Estados Unidos y a Fortuna, variedad forrajera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) liberada en México. La investigación se llevó a cabo en la Región Sur de Tamaulipas, dentro del Campo Experimental Las Huastecas del INIFAP. Las variables medidas fueron: biomasa y concentración de azúcares. Éstas se evaluaron en densidades de población baja, intermedia y alta. Los resultados mostraron que la región presenta condiciones adecuadas para el desarrollo de variedades de sorgo dulce, donde las altas densidades de población (200-210 mil plantas ha⁻¹) proveen suficiente biomasa aprovechable en el proceso de producción de biocombustibles (hasta 50 t ha⁻¹). Por otro lado, la concentración de azúcares se comportó aceptablemente al ubicarse dentro de los rangos reportados en la literatura para las variedades de sorgo dulce: 16-19 °Brix. Finalmente, Fortuna mostró sus mejores atributos en la siembra de octubre, mientras que M81E lo hizo en la siembra de diciembre.

Palabras clave: sorgos dulces, variedades, biomasa, concentración de azúcares, biocombustibles.

ABSTRACT

Two varieties of sweet sorghum were evaluated in three planting dates with the objective of exploring potential for ethanol production. The genotypes studied were M81E, variety introduced from the University of Kentucky, USA and Fortuna, forage variety from Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Mexico. The investigation was conducted in the Southern Region of Tamaulipas. Two variables were measured: biomass and sugar concentration (°Brix). Three population densities (low, intermediate and high) were used. The results showed that the region presents appropriate conditions for the development of sweet sorghum varieties, where high population densities (200-210 thousand plants ha⁻¹) provide enough biomass profitable in the process of biofuels production. The °Brix behaved acceptably falling within the range reported in the literature: 16-19 Brix degrees. Finally, Fortuna showed his best attributes when planted in October, while M81E did when planted in December.

Key words: sweet sorghum, varieties, biomass, sugar content, biofuels.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual se encuentra en la búsqueda de fuentes alternativas de energía, debido principalmente a la creciente demanda de combustibles en el mundo, la volatilidad en sus precios y los impactos negativos que genera la combustión de hidrocarburos fósiles en el ambiente (ASERCA, 2007). Este argumento ha dado origen a diversas investigaciones a nivel mundial, en los ámbitos de las ciencias básicas y de aplicación

práctica, tanto de la iniciativa privada como del sector público. En el caso de México, los sectores agropecuario y forestal de pronto se han visto involucrados en proyectos encaminados a la determinación del potencial productivo de los cultivos anuales y perennes para la obtención de biocombustibles.

Aunque el sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, es más conocido como cereal, las variedades dulces, que se caracterizan por su intensa fotosíntesis,

producen tallos frondosos de hasta 5 m de altura y además su contenido de azúcar es alto, de donde puede obtenerse piloncillo o destilarse para producir alcohol etílico, conocido también como etanol. Por esta razón es que dichas variedades están acaparando la atención de los inversionistas, ya que además es un cultivo que presenta: crecimiento rápido en climas cálidos, relativamente buena tolerancia a la sequía, resistencia a periodos cortos de inundación y adaptación a una amplia gama de suelos, entre otras cualidades (FAO, 2002; De la Cruz, 2007; ICRISAT, 2008).

El etanol, derivado del origen de los biocombustibles, hidrocarburos obtenidos de grasas animales o biomasa vegetal que se destinan para la generación de energía, ya sea directamente o mezclados con otros productos, sus principales beneficios son: no generan emisiones de gases dañinos a la atmósfera y son renovables, por lo tanto representan una fuente inagotable de energía (Anzil, 2007). En este sentido, el etanol y el biodiesel están incrementando su participación en el sector energético, siendo el primero el que ha tenido mayor auge (ASERCA, 2007).

Los sorgos dulces pueden alcanzar rendimientos de tallo de 35 a 50 t ha⁻¹ (Raveendran, 2006), una cantidad de biomasa considerable, característica importante en un cultivo cuyos fines se encaminan a la producción de biocombustibles, principalmente de etanol. De acuerdo con Sanjuan *et al.* (2007), los datos del Balance Nacional Energético de México mostraron que la biomasa participó con el 3,4% en la estructura de la energía del país en el 2004, un porcentaje muy bajo comparado con el 90,6% que representaron los hidrocarburos fósiles en el mismo año. Lo cual nos indica el gran espacio de oportunidad que tiene la biomasa como materia prima, si se piensa en la obtención de combustibles a partir de fuentes renovables.

El etanol es un alcohol, producto de la fermentación de sustancias azucaradas, provenientes principalmente de caldos dulces, granos almidonosos, fibra o lignocelulosa. Actualmente la mayor producción de etanol utiliza como materia prima la caña de azúcar y el grano de maíz, y los países en donde más se fabrica son Estados Unidos y Brasil (Serna, 2007). No obstante, estos cultivos también son proveedores de productos alimenticios, lo cual ha generado una gran controversia cuando se habla de su uso en la fabricación de biocombustibles, ya que se

descompensaría el abasto de dichos productos. Debido a lo anterior, el sorgo dulce se perfila como la mejor alternativa para suplir el uso de la caña de azúcar y del maíz en la extracción de etanol, ya que sus atributos como materia prima son equiparables a los de dichos cultivos. Así, el sorgo dulce alcanza a producir hasta 5,600 l ha⁻¹ de etanol, sobre dos ciclos del cultivo de 70 t ha⁻¹ de tallo molido, en tanto que la caña produce 6,500 l ha⁻¹, sobre 85-70 t ha⁻¹ de caña molida por cosecha (De la Cruz, 2007).

Las bondades que actualmente se le atribuyen al sorgo dulce para su uso en la producción de biocombustibles motivaron a la empresa Terra Hellios Alternative Energy Solutions (THAES) para poner en marcha un proyecto de investigación, en coordinación con el Campo Experimental Las Huastecas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), con la finalidad de dilucidar los atributos productivos del sorgo dulce para la obtención de etanol y determinar la factibilidad real de su explotación comercial en la región de Las Huastecas. La Huasteca se localiza al Noreste de México y comprende el Sur de Tamaulipas, el Oriente del San Luis Potosí y el Norte de Veracruz. Según el INEGI (2008), el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, propicio para el establecimiento de dos ciclos de cultivo: primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I).

El objetivo principal fue evaluar la producción de biomasa y la concentración de azúcares de la variedad de sorgo dulce M81E, proveniente de la Universidad de Kentucky, Estados Unidos, contrastándola con la variedad de sorgo forrajero Fortuna, considerado como testigo regional mexicano, liberado por el INIFAP.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció empleando tres fechas de siembra: 29 de octubre, 21 de noviembre y 19 de diciembre, todas en el año 2007. Se utilizó el diseño experimental de bloques al azar en arreglo de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Según Little y Jackson (1981), el arreglo en parcelas divididas se emplea frecuentemente en experimentos factoriales, en los que la naturaleza del material experimental o las operaciones contempladas dificultan el manejo de todas las combinaciones de factores en una misma forma. El diseño básico involucra la asignación de tratamientos de un factor a parcelas principales dispuestas en un diseño

completamente aleatorio, de bloques completos al azar o de cuadrado latino. Los tratamientos del segundo factor se asignan a subparcelas dentro de cada parcela principal (Corona, 1982). En este caso, los factores considerados fueron: variedades, las cuales se asignaron a la parcela principal y densidades de población, las cuales correspondieron a la subparcela. El modelo estadístico que se utiliza para un diseño experimental de bloques al azar en arreglo de parcelas divididas de acuerdo con Little y Jackson (1991), es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_{ik} + \beta_j + (\delta\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}; i = 2, j = 3 \text{ y } k = 4$$

Donde:

μ = Media general

α_i = Efecto del *i*-ésimo nivel del factor de parcela principal (Variedades de sorgo)

δ_{ik} = Error de la parcela principal

β_j = Efecto del *j*-ésimo nivel de la subparcela (Densidades de población)

$(\delta\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción AB en la combinación *ij*

ε_{ijk} = Error de la subparcela

Las variedades evaluadas fueron: M81E, de la Universidad de Kentucky, USA y Fortuna, como testigo, variedad forrajera del INIFAP.

La siembra se realizó considerando tres densidades:

- Baja: 60-70 mil plantas ha⁻¹
- Intermedia: 130-140 mil plantas ha⁻¹
- Alta: 200-210 mil plantas ha⁻¹

La parcela experimental consistió de 24 surcos de 5 m de longitud para la parcela grande y 8 surcos de la misma longitud para la parcela chica.

En cuanto al manejo agronómico, se aplicó el paquete tecnológico generado por el INIFAP para sorgo granífero en el sur de Tamaulipas. En la fertilización se aplicó la fórmula 120-50-52, dividido el nitrógeno en dos aplicaciones: 80 kg ha⁻¹ al momento de la siembra y 40 kg ha⁻¹ a los 30 días después de la primera aplicación. Las siembras de

noviembre y diciembre demandaron el suministro de riegos complementarios al cultivo, debido a la ausencia de lluvia a lo largo de la estación de crecimiento. Las variables medidas fueron: biomasa de materia verde en kg por hectárea y concentración de azúcares en el tallo en °Brix.

Se realizaron cuatro muestreos: al momento de la floración, a los 15, 30 y 45 días después de esta (Muestreos 1, 2, 3 y 4, respectivamente). Los datos fueron contrastados estadísticamente mediante un análisis de varianza y una comparación de medias de acuerdo a Tukey ($p \leq 0,05$), para lo cual se utilizó el programa estadístico SAS V8.0 (1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera fecha de siembra (29 de octubre de 2007)

De acuerdo con los datos que se pueden observar en el Cuadro 1, hubo diferencias estadísticas para densidades y variedades en todas las variables y en todos los muestreos. No fue así para la interacción densidades por variedades (D*V), la cual no mostró diferencias estadísticas en los siguientes casos: peso verde de tallo en el muestreo 1, peso verde de panoja en los muestreos 1, 2 y 3, y peso verde total en el muestreo 1. El resto de los casos mostró diferencias estadísticas.

En cuanto a densidades de población, la densidad alta (200-210 mil plantas ha⁻¹) arrojó la mayor cantidad de biomasa total producida en verde y superó estadísticamente a la densidad media (120-140 mil plantas ha⁻¹) y a la baja (60-70 mil plantas ha⁻¹) (Cuadro 2). Por otro lado, en la etapa de floración (primer muestreo), la cantidad total de biomasa fue más elevada en las densidades alta y baja con 50,65 y 14,93 t ha⁻¹, respectivamente. Posteriormente, la producción decayó hasta alcanzar 39,36 t ha⁻¹ y 10,65 ha⁻¹ en el muestreo 4, aproximadamente a los 45 días después de la floración. La densidad media alcanzó la mayor producción de biomasa en el muestreo 2 con 33,56 t ha⁻¹, el valor más bajo lo registró a los 45 días después de la floración con 27,01 t ha⁻¹.

Cabe señalar que el tallo fue la parte de la planta que mayor cantidad de biomasa aportó durante todos los muestreos para las tres densidades de población. Obtuvo la producción más alta en el muestreo 1 con la mayor densidad de población (34,37 t ha⁻¹) y la más baja en el muestreo 4 para la menor densidad con 6,62 t ha⁻¹ (Cuadro 2). Esto es

importante si se considera que los azúcares, requeridos durante el proceso de extracción del etanol, se concentran precisamente en el tallo.

Las diferencias entre variedades se observan en el Cuadro 3, donde es notoria la ventaja de Fortuna sobre M81E para todas las variables y para todos los muestreos. Fortuna alcanzó la mayor producción de biomasa total a los 15 días después de la floración (muestreo 2) con 46,32 t ha⁻¹ y M81E al momento de la floración (muestreo 1) con 22,14 t ha⁻¹. Nuevamente fue el tallo el que más participó en el aporte de biomasa. En los dos casos alcanzó su valor máximo en la etapa de floración, con 27,67 t ha⁻¹ para Fortuna y 16,96 t ha⁻¹ para M81E.

El contenido de azúcares no presenta ninguna diferencia en lo que a densidades se refiere, ya que todos se ubicaron dentro del mismo grupo de significación (Cuadro 4).

No obstante, se detectaron diferencias estadísticas entre variedades en los muestreos 1 y 2, destacándose Fortuna por la mayor concentración de azúcares (13,15 grados Brix a los 15 días después de la floración). Mientras que el valor máximo en M81E fue de 9,05 grados Brix a los 15 días después de la floración (Cuadro 4).

Segunda fecha de siembra (21 de noviembre de 2007)

El análisis estadístico para la segunda fecha de siembra (Cuadro 5) determinó diferencias significativas para densidades y variedades en la mayoría de los muestreos. Sólo en el caso del peso verde de tallo (muestreo 2), las diferencias entre variedades fueron significativas. La interacción D*V fue significativa en: peso verde de tallo en los muestreos 1 y 4, peso verde de hojas en todos los muestreos, peso verde de panoja en los muestreos 1, 2

Cuadro 1. Cuadrados medios y su significación para biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja en dos variedades de sorgo dulce a tres densidades de población. Fecha de siembra del 29 de octubre de 2007, Villa Cuauhtémoc, México.

Factor	Cuadrados Medios			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Peso verde de tallo				
Densidades	1174,86 **	913,52 **	744,59 **	659,99 **
Variedades	687,73 **	1426,97 **	789,39 **	976,93 **
D*V	46,05 ns	116,56 *	82,46 *	99,11 *
C.V.	26,76	24,99	20,98	23,27
R ²	0,91	0,94	0,95	0,95
Peso verde de hoja				
Densidades	118,68 **	93,67 **	95,04 **	55,09 **
Variedades	378,21 **	490,22 **	285,01 **	246,00 **
D*V	37,45 *	48,25 **	25,78 **	30,72 **
C.V.	32,81	32,82	24,38	39,80
R ²	0,94	0,95	0,97	0,94
Peso verde de panoja				
Densidades	28,72 **	77,14 **	85,42 **	58,78 **
Variedades	42,48 **	84,32 **	181,73 **	135,03 **
D*V	4,24 ns	10,23 ns	23,04 ns	17,98 **
C.V.	38,73	28,83	50,92	20,96
R ²	0,87	0,91	0,84	0,96
Peso verde de planta completa				
Densidades	2551,98 **	2360,74 **	2133,11 **	1659,41 **
Variedades	2723,84 **	4774,65 **	3416,23 **	3429,36 **
D*V	222,95 ns	437,87 *	356,55 *	386,99 **
C.V.	29,01	24,74	25,40	22,65
R ²	0,91	0,95	0,94	0,96

** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$); * Diferencias significativas ($p \leq 0,05$); ns Diferencias no significativas ($p > 0,05$).

y 3 y peso verde total en los muestreos 1, 3 y 4, significativa para el peso verde de panoja (muestreos 2 y 3) y peso verde total (muestreo 3) y no significativa para los casos restantes.

La densidad de población alta fue la más sobresaliente en cuanto a producción de biomasa

durante los 4 muestreos, alcanzó 38,07 t ha⁻¹ en la etapa de floración, disminuyendo a 24,80 t ha⁻¹ a los 45 días después de ésta (Cuadro 6). La densidad baja obtuvo la producción más baja durante todos los muestreos. Su valor más alto fue en el muestreo 2 con 12,68 t ha⁻¹ (Cuadro 6).

Cuadro 2. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja en cuatro muestreos a partir de antesis, para tres densidades de población en sorgo dulce. Fecha de siembra del 29 de octubre de 2007, Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Número de Plantas ha ⁻¹ (Miles)	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Tallo	Hojas	Panoja	Total
Muestreo 1				
60-70	10,13 c	3,08 c	1,72 c	14,93 c
120-140	22,43 b	6,65 b	3,70 a	32,80 b
200-210	34,37 a	10,77 a	5,51 a	50,65 a
Muestreo 2				
60-70	8,78 c	2,69 c	2,93 b	14,41 c
120-140	20,08 b	6,45 b	7,04 a	33,56 b
200-210	30,14 a	9,52 a	9,02 a	48,68 a
Muestreo 3				
60-70	8,31 c	2,46 c	2,70 b	13,48 c
120-140	17,03 b	6,23 b	6,45 ab	29,70 b
200-210	27,58 a	9,34 a	9,20 a	46,12 a
Muestreo 4				
60-70	6,62 c	1,66 c	2,37 c	10,65 c
120-140	16,71 b	4,45 b	5,85 b	27,01 b
200-210	24,74 a	6,91 a	7,71 a	39,36 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$)

Cuadro 3. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hojas y panoja en cuatro muestreos a partir de antesis, en dos variedades de sorgo dulce. Fecha de siembra del 29 de octubre de 2007, Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Variedad	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Tallo	Hojas	Panoja	Total
Muestreo 1				
M81E	16,96 b	2,87 b	2,31 b	22,14 b
Fortuna	27,67 a	10,81 a	4,98 a	43,45 a
Muestreo 2				
M81E	11,96 b	1,70 b	4,46 b	18,11 b
Fortuna	27,38 a	10,74 a	8,21 a	46,32 a
Muestreo 3				
M81E	11,90 b	2,56 b	3,37 b	17,83 b
Fortuna	23,38 a	9,45 a	8,87 a	41,69 a
Muestreo 4				
M81E	9,64 b	1,14 b	2,94 b	13,72 b
Fortuna	22,40 a	7,54 a	7,68 a	37,63 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

En cuanto a los componentes de la planta, el tallo aportó la mayor cantidad de biomasa durante los 4 muestreos, éste participó con 25,45 t ha⁻¹ para la densidad alta al momento de la floración, bajando su producción a 16,97 t ha⁻¹ en el muestreo 4 (Cuadro 6).

Los resultados entre variedades arrojaron que Fortuna superó en producción de biomasa a M81E en todos los muestreos. Su mayor rendimiento fue de 33,49 t ha⁻¹ en el muestreo 1, mientras que en M81E fue de 17,33 en el muestreo 2 (Cuadro 7).

Cuadro 4. Concentración de azúcares de dos variedades de sorgo dulce en cuatro muestreos a partir de antesis para tres densidades de población. Fecha de siembra del 29 de octubre de 2007.

Muestreos	Concentración de azúcares (Grados Brix)				
	Plantas ha ⁻¹ (Miles)			Variedades	
	60-70	120-140	200-210	M81E	Fortuna
1	6,60 a	6,25 a	7,85 a	5,92 b	7,88 a
2	10,00 a	11,70 a	11,60 a	9,05 b	13,15 a
3	7,57 a	9,00 a	8,35 a	6,93 a	9,68 a
4	10,05 a	7,92 a	9,42 a	8,58 a	9,68 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey.

Cuadro 5. Cuadrados medios y su significación para peso verde de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja, en dos variedades de sorgos dulces. Fecha de siembra del 21 de noviembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Factor	Cuadrados Medios			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
	Peso verde de tallos			
Densidades	667,23 **	377,51 **	350,88 **	248,27 **
Variedades	502,00 **	251,28 *	344,71 **	406,31 **
D*V	45,77 **	6,24 ns	13,87 ns	26,83 **
C.V.	11,50	36,66	15,32	10,14
R ²	0,98	0,84	0,97	0,99
	Peso verde de hojas			
Densidades	50,45**	45,20 **	12,59 **	15,22 **
Variedades	162,05 **	195,46 **	84,58 **	45,65 **
D*V	10,64**	19,29 **	4,93 **	2,66 **
C.V.	14,79	11,54	14,57	21,08
R ²	0,98	0,99	0,99	0,96
	Peso verde de panoja			
Densidades	24,46 **	52,17 **	12,01 **	15,90 **
Variedades	60,58 **	57,41 **	15,62 **	9,59 **
D*V	2,83 **	2,43 *	3,12 *	1,66 ns
C.V.	21,61	12,50	26,98	25,77
R ²	0,96	0,98	0,91	0,90
	Peso verde de planta completa			
Densidades	1434,38 **	1109,59 **	823,56 **	511,03 **
Variedades	1842,05 **	1399,49 **	1345,39 **	1109,32 **
D*V	135,44 **	58,77 ns	62,78 *	61,59 **
C.V.	10,99	20,70	15,52	8,94
R ²	0,99	0,94	0,97	0,99

** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$); * Diferencias significativas ($p \leq 0,01$); ns Diferencias no significativas ($p > 0,05$).

La concentración de azúcares no presentó diferencias estadísticas entre densidades, mientras que entre variedades los valores se ubicaron dentro del mismo grupo de significación sólo en el muestreo 3. Para los otros muestreos, Fortuna superó a M81E en

cantidad de azúcares y su valor más alto fue de 14,83 grados Brix en el muestreo 4. Por su parte, M81E alcanzó 17,31 grados Brix en el muestreo 3, aunque no hubo diferencia significativa con Fortuna (12,83 grados Brix) (Cuadro 8).

Cuadro 6. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja, en cuatro muestreos a partir de antesis, para tres densidades de población en sorgo dulce. Fecha de siembra del 21 de noviembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Número de Plantas ha ⁻¹ (Miles)	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Tallo	Hoja	Panoja	Total
Muestreo 1				
60-70	7,18 c	2,26 c	1,85 c	11,29 c
120-140	16,26 b	4,96 b	3,59 b	24,82 b
200-210	25,45 a	7,28 a	5,34 a	38,07 a
Muestreo 2				
60-70	7,66 b	2,19 c	2,83 c	12,68 c
120-140	16,03 a	4,50 b	5,53 b	25,06 b
200-210	21,28 a	6,94 a	7,93 a	36,16 a
Muestreo 3				
60-70	6,29 c	1,66 c	2,19 b	10,09 c
120-140	14,01 b	3,69 b	4,61 a	22,31 b
200-210	19,47 a	4,77 a	6,00 a	30,23 a
Muestreo 4				
60-70	5,83 c	1,44 c	1,57 b	8,85 c
120-140	11,42 b	2,81 b	3,44 a	17,67 b
200-210	16,97 a	3,95 a	3,88 a	24,80 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Cuadro 7. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja en cuatro muestreos a partir de antesis, de dos variedades de sorgo dulce. Fecha de siembra del 21 de noviembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Variedad	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Tallo	Hoja	Panoja	Total
Muestreo 1				
M81E	11,72 b	2,23 b	2,00 b	15,97 b
Fortuna	20,87 a	7,43 a	5,18 a	33,49 a
Muestreo 2				
M81E	11,75 b	1,69 b	3,88 b	17,33 b
Fortuna	18,22 a	7,40 a	6,98 a	32,60 a
Muestreo 3				
M81E	9,47 b	0,89 b	2,92 b	13,28 b
Fortuna	17,05 a	5,82 a	5,61 a	28,48 a
Muestreo 4				
M81E	7,30 b	0,86 b	2,16 b	10,31 b
Fortuna	15,52 a	4,61 a	3,77 a	23,91 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tercera fecha de siembra (19 de diciembre de 2007)

Los resultados indicaron que para la siembra de diciembre hubo diferencias estadísticas significativas en densidades para todas las variables,

en todos los muestreos (Cuadro 9). Las variedades presentaron diferencias significativas sólo en el peso verde de hojas en el muestreo 3, peso verde de panoja y peso verde total en el muestreo 4. Se apreciaron diferencias significativas entre variedades en peso verde de tallo en los muestreos 1 y 4, peso verde de

Cuadro 8. Concentraciones de azúcares en cuatro muestreos a partir de antesis, para dos variedades de sorgo dulce a tres densidades de población. Fecha de siembra del 21 de noviembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Muestreos	Concentración de Azúcares (Grados Brix)				
	Plantas ha ⁻¹ (Miles)			Variedades	
	60-70	120-140	200-210	M81E	Fortuna
1	9,07 a	7,87 a	7,72 a	5,85 b	10,60 a
2	10,17 a	10,45 a	10,80 a	8,45 b	12,50 a
3	20,65 a	12,27 a	12,30 a	17,31 a	12,83 a
4	11,57 a	11,12 a	12,67 a	8,75 b	14,83 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Cuadro 9. Cuadrados medios y su significación para peso verde de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja, en dos variedades de sorgos dulces. Fecha de siembra del 19 de diciembre de 2007.

Factor	Cuadrados Medios			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
	Peso verde de tallos			
Densidades	754,73 **	723,40 **	556,19 **	475,51 **
Variedades	82,91 *	28,23 ns	0,25 ns	90,20 *
D*V	26,36 ns	45,67 ns	0,37 ns	25,78 ns
C.V.	19,54	29,94	12,15	19,97
R ²	0,93	0,85	0,97	0,92
	Peso verde de hojas			
Densidades	59,38 **	82,29 **	62,17 **	75,26 **
Variedades	0,03 ns	11,64 *	4,62 **	37,18 *
D*V	3,65 ns	1,08 ns	0,26 ns	3,78 ns
C.V.	20,09	18,35	11,35	33,04
R ²	0,92	0,94	0,97	0,86
	Peso verde de panoja			
Densidades	27,36 **	35,09 **	6,77 **	5,87 **
Variedades	0,16 ns	16,74 *	0,53 ns	10,11 **
D*V	2,13 ns	0,55 ns	0,18 ns	0,50 ns
C.V.	19,92	27,87	14,36	41,75
R ²	0,93	0,86	0,95	0,81
	Peso verde total de las plantas			
Densidades	1631,20 **	1751,99 **	1157,57 **	1082,73 **
Variedades	72,76 ns	164,27 ns	0,84 ns	352,50 **
D*V	63,22 ns	33,68 ns	0,30 ns	35,34 ns
C.V.	17,43	25,45	10,67	20,73
R ²	0,94	0,88	0,97	0,92

** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$); * Diferencias significativas ($p \leq 0,05$); ns Diferencias no significativas ($p > 0,05$).

hoja en los muestreos 2 y 4, y peso verde de panoja en el muestreo 2. Por otro lado, no se observaron diferencias significativas en peso verde de tallo en los muestreos 2 y 3, peso verde de hojas en el muestreo 1, peso verde de panoja en los muestreos 1 y 3, y peso verde total en los muestreos 1, 2 y 3. La interacción D*V tampoco fue significativa, para todas las variables en el total de los muestreos (Cuadro 9).

La producción de biomasa nuevamente resultó superior en la densidad más alta, la cual en esta ocasión alcanzó su mayor rendimiento a los 15 días después de la floración (muestreo 2) con 46,87 t ha⁻¹, a diferencia de las dos fechas de siembra anteriores, donde obtuvo los valores más altos en el primer muestreo. Le siguen en orden decreciente las densidades media y baja, ambas también produjeron la mayor cantidad de biomasa en el muestreo 2, con 32,42 t ha⁻¹ y 17,28 t ha⁻¹, respectivamente. El tallo aportó valores máximos similares en la densidad alta en los muestreos 1 y 2 (29,41 y 29,68 t ha⁻¹, respectivamente). Éste superó en cantidad de biomasa a las hojas y a la panoja (Cuadro 10).

El análisis para variedades demostró que las diferencias existentes entre Fortuna y M81E en la biomasa de planta completa no son significativas en

este caso, colocando a los 2 genotipos en el mismo grupo de significación en los tres muestreos. La producción máxima de Fortuna y M81E fue de 34,80 y 29,57 t ha⁻¹, respectivamente, ambos en el muestreo 2. En el muestreo 4, Fortuna superó a M81E con valores estadísticamente significativos (29,41 y 21,74 t ha⁻¹, respectivamente) (Cuadro 11).

La concentración de azúcares también mostró un patrón diferente durante esta fecha siembra, ya que entre densidades y entre variedades, la mayoría de los datos se encuentran dentro del mismo grupo de significación, a diferencia de las fechas de siembra anteriores, donde los resultados entre variedades mostraron diferencias significativas. El mayor valor fue de 18,16 grados Brix para la densidad alta en el muestreo 3, en el caso de densidades. Con respecto a variedades, el valor más alto lo alcanzó M81E con 16,82 grados Brix en el muestreo 4 (Cuadro 12).

d) Comparación entre fechas de siembra

El comportamiento de Fortuna durante las dos primeras fechas de siembra denota su capacidad adaptativa a las condiciones climáticas y edáficas de la región, ya que en la mayoría de las variables evaluadas superó a M81E. Esta variedad mostró sus

Cuadro 10. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja en cuatro muestreos a partir de antesis, para tres densidades de población en sorgo dulce. Fecha de siembra del 19 de diciembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Número de Plantas ha ⁻¹ (Miles)	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Tallo	Hoja	Panoja	Total
Muestreo 1				
60-70	9,99 c	3,00 c	1,78 c	14,78 c
120-140	19,44 b	5,85 b	3,87 b	29,16 b
200-210	29,41 a	8,45 a	5,47 a	43,33 a
Muestreo 2				
60-70	10,66 c	3,93 c	2,68 b	17,28 c
120-140	20,06 b	7,20 b	5,16 a	32,42 b
200-210	29,68 a	10,35 a	6,84 a	46,87 a
Muestreo 3				
60-70	9,66 c	2,99 c	1,36 c	14,02 c
120-140	18,23 b	5,52 b	2,52 b	26,31 b
200-210	26,33 a	8,56 a	3,18 a	38,07 a
Muestreo 4				
60-70	9,37 c	3,03 b	1,10 b	13,50 c
120-140	18,02 b	6,43 a	2,07 ab	26,52 b
200-210	24,75 a	9,15 a	2,8 a	36,71 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

mejores atributos en la última fecha de siembra, donde presentó una productividad de biomasa similar a Fortuna y con una concentración de azúcares ($^{\circ}\text{Brix}$) equivalente, lo que pone de manifiesto su mejor adaptación a condiciones de otoño-invierno en regiones tropicales y subtropicales. Los resultados obtenidos en el sur de Tamaulipas, pueden ser complementados con los resultados de la investigación realizada por Valenzuela *et al.* (2008) en la región Noroeste de México, donde se evaluaron varios genotipos de sorgos dulces en varias fechas de siembra. Destacando que el mejor comportamiento de las variedades evaluadas, entre ellas Fortuna, lo mostraron durante la fecha de siembra correspondiente al mes de junio ($100\text{-}104\text{ t ha}^{-1}$ de biomasa en un solo corte), mientras que los resultados más bajos ($43\text{-}61\text{ t ha}^{-1}$ de biomasa en un solo corte)

se obtuvieron en la fecha de siembra de octubre. Es decir, la mayoría de los genotipos registraron su mejor potencial en las condiciones de primavera-verano, aunque Fortuna no fue de las más sobresalientes en esa región. Las variedades con mayor rendimiento de biomasa fueron: Silo Miel II, Sorgo Dulce Sabrosa, Beef Builder y Cow Vitales II. M81E no fue considerada en ese estudio.

El número de plantas por hectárea tuvo una relación directa con la producción de biomasa, debido a que la densidad de población alta superó a las densidades media y baja en todas las fechas de siembra (Figura 1). El mayor rendimiento se presentó en la primera fecha de siembra al momento de la floración, con $50,65\text{ t ha}^{-1}$ para la densidad alta. Se observó que el tallo aportó la mayor cantidad de

Cuadro 11. Biomasa de planta completa y sus componentes: tallo, hoja y panoja en cuatro muestreos a partir de antesis, de dos variedades de sorgo dulce. Fecha de siembra del 19 de diciembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Variedad	Biomasa (t ha^{-1})			
	Tallo	Hoja	Panoja	Total
Muestreo 1				
M81E	17,76 b	5,80 a	3,79 a	27,35 a
Fortuna	21,47 a	5,73 a	3,62 a	30,83 a
Muestreo 2				
M81E	19,05 a	6,46 b	4,06 b	29,57 a
Fortuna	21,22 a	7,86 a	5,73 a	34,80 a
Muestreo 3				
M81E	18,19 a	5,25 b	2,51 a	25,95 a
Fortuna	17,98 a	6,13 a	2,21 a	26,32 a
Muestreo 4				
M81E	15,44 b	4,96 b	1,34 b	21,74 b
Fortuna	19,32 a	7,45 a	2,64 a	29,41 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna y muestreo no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

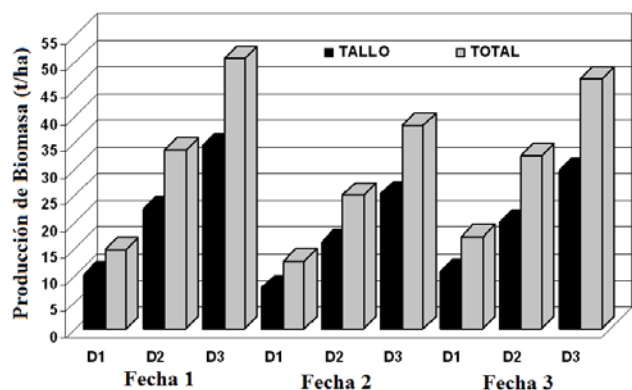
Cuadro 12. Concentración de azúcares en cuatro muestreos a partir de antesis, de dos variedades de sorgo dulce, a tres densidades de población. Fecha de siembra del 19 de diciembre de 2007. Villa Cuauhtémoc Tamaulipas, México.

Muestreo	Concentración de Azúcares (Grados Brix)				
	Plantas ha^{-1} (Miles)			Variedades	
	60-70	120-140	200-210	M81E	Fortuna
1	7,95 a	9,87 a	9,35 a	9,02 a	9,10 a
2	10,45 b	10,75 ab	13,17 a	11,72 a	11,20 a
3	16,81 a	15,63 a	18,16 a	16,81 a	15,46 a
4	16,72 a	15,57 a	17,12 a	16,82 a	15,47 a

Nota: Valores con la misma letra dentro de una misma columna no presentan diferencias estadísticas entre ellos de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

biomasa, aunque no igualó a las 35-50 t ha⁻¹ que reporta Raveendran (2006). Lo anterior coincide con lo reportado por Montes (2008), ya que en evaluaciones de densidades de población en variedades de sorgos dulces realizadas en el Norte de Tamaulipas, el mayor peso de tallo y la mayor producción de biomasa se registraron al momento de la floración. En Uruguay, poblaciones altas de sorgos dulces (14 plantas/m) produjeron 25% más materia verde que poblaciones bajas (7 plantas/m) (Siri-Prieto *et al.*, 2006).

No obstante, cuando comparamos la producción de biomasa, considerando el efecto entre variedades, observamos que el mayor rendimiento se concentra tanto al momento de la floración como a los 15 días después de ésta. Fortuna obtuvo 46,32 t ha⁻¹, su mayor producción en todo el estudio, en la primera fecha de siembra durante el muestreo 2. Por su parte, M81E alcanzó su mejor rendimiento, 29,57 t ha⁻¹, en la tercera fecha de siembra durante el muestreo 2. En las fechas de siembra 1 y 2, Fortuna superó claramente a M81E, mientras que en la fecha de siembra 3, los valores de biomasa fueron muy similares en las dos variedades (Figura 2). Si consideramos que en el Uruguay M81E alcanza un máximo de 60 t ha⁻¹ de tallo limpio en regiones de 900 mm de precipitación anual (Siri-Prieto, 2008), observamos que su potencial para la región Huasteca de Tamaulipas fue bajo, puesto que esta región presenta una precipitación anual comparable. No obstante, es importante hacer notar que en este caso tienen singular importancia las fechas de siembra, puesto que las menores productividades reportadas en



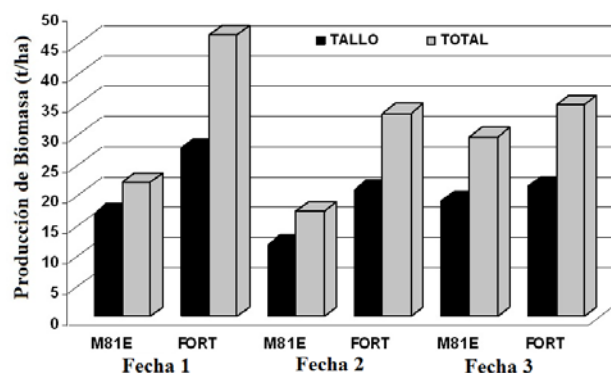
D1 = Densidad baja; D2 = Densidad media; D3 = Densidad alta (60-70, 130-140 y 200-210 mil plantas⁻¹, respectivamente).
Fecha 1 = 29 de octubre; Fecha 2 = 21 de noviembre y Fecha 3 = 19 de diciembre, todas en el año 2007

Figura 1. Producción máxima de biomasa de tres densidades de población en tres fechas de siembra de 2007, en la región Huasteca de Tamaulipas, México

el noroeste de México (Valenzuela, 2008) coinciden con los meses en los que se realizó la presente investigación en el noreste. Por otra parte, también permiten suponer que es posible incrementar la productividad obtenida mediante un mejor manejo del riego, la fertilización y demás factores de manejo agronómico involucrados. Asimismo, es importante señalar que los resultados de la presente investigación, deberán ser enriquecidos mediante la inclusión de otros ambientes de evaluación realizados paralelamente tanto en el norte como en el sur del Estado de Tamaulipas, los cuales permitirán tener una cuantificación más completa del potencial del sorgo dulce para la obtención de etanol en el noreste de México.

Respecto a la concentración de azúcares, la tendencia fue a incrementar su concentración en los muestreos 3 y 4 en las dos últimas fechas de siembra. Así, Fortuna registró un máximo de 15,47 en el muestreo 4 de la tercera fecha y M81E de 17,31 en el muestreo 3 de la segunda fecha (Figura 3). Undersander *et al.* (1990) reportan 12,7° Brix para M81E, valor inferior al registrado en esta investigación.

De igual manera sucedió en los estudios realizados por Valenzuela *et al.* (2008), quien en el Noroeste de México observó que conforme las fechas de siembra se aproximaban al ciclo otoño-invierno, las variedades de sorgo dulce incrementaban su concentración de azúcares. De tal manera que en la fecha de siembra correspondiente al 23 de octubre, 14 de las variedades evaluadas superaron los 20 grados Brix. En este caso, Fortuna fue de las variedades que



Variedades: M81E y FORT = Fortuna
Fecha 1 = 29 de octubre; Fecha 2 = 21 de noviembre y Fecha 3 = 19 de diciembre, todas en el año 2007

Figura 2. Producción máxima de biomasa de dos variedades de sorgo dulce en tres fechas de siembra de 2007, en la región de la Huasteca Tamaulipeca.

mayor cantidad de azúcar acumuló al alcanzar los 22,7 grados Brix, valor que superó a los 15,47 que registró en el presente estudio.

Esta tendencia observada en la Huasteca y en el Noroeste de México no se presentó en el Norte de Tamaulipas, ya que según Montes (2008), el mayor contenido de azúcar en las variedades evaluadas en dicha región ocurrió durante la fecha de siembra de julio.

CONCLUSIONES

- La región Huasteca Tamaulipeca presenta condiciones climáticas y edáficas adecuadas para el cultivo de variedades de sorgos dulces con potencial para la extracción de etanol.
- Altas densidades de población permitieron obtener mayor producción de biomasa.
- Fortuna presentó mejores atributos de biomasa en la fecha de siembra del 29 de octubre, mientras que M81E lo hizo en fecha de siembra del 19 de diciembre.
- Los azúcares totales, medidos en grados Brix, mostraron su más alta concentración en las plantas a partir de los 15 días después de la floración, la cual se mantiene hasta los 45 días. Las mayores concentraciones fueron registradas para las fechas de siembra del 21 de noviembre (M81E) y del 19 de diciembre (Fortuna).

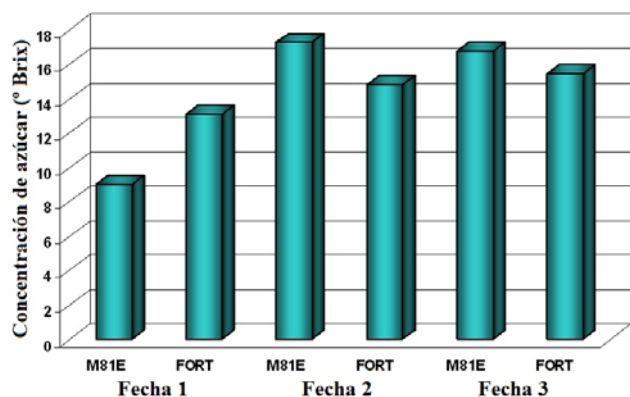


Figura 3. Concentración de azúcares (grados Brix) de dos variedades de sorgo dulce en tres fechas de siembra del 2007, en la región Huasteca Tamaulipeca.

LITERATURA CITADA

- Anzil, F. 2007. Biocombustibles. Zona Económica [Portal electrónico consultado el 16 de septiembre de 2008, <http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>].
- Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA). 2007. Biodiesel: combustible del futuro. Claridades Agropecuarias. 163: 3-12.
- Corona, L. M. 1982. Curso de experimentación agrícola. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. México, s/p.
- De la Cruz, R. 2007. El sorgo dulce. Monografías.com [Portal electrónico consultado el 10 de septiembre de 2008, www.monografias.com/trabajo51/sorgo.dulce/sorgo.dulce2.shtml]
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2002. Sorgo dulce en China. Enfoques. [Revista electrónica consultada el 16 de septiembre de 2008, <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0202es2.htm>]
- International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT). 2008. Sorgo, un cultivo milagroso para la alimentación y biocombustibles. [Portal electrónico consultado el 13 de mayo de 2008, <http://www.biodiesel.com.ar/?p=809#more-809>]
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2008. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. [Portal electrónico consultado el 12 de septiembre de 2008, www.inegi.gob.mx]
- Little, T. y F. Jackson. 1991. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Editorial Trillas. México, 270 p.
- Montes, N. 2008. El sorgo dulce. In: Torres L., E.; V. Pecina; S. Montes; M. Hernández; J. M. Arreola; J. T. Frías; V. Fernández; O. L. Rivas; V. J. Hernández; G. León y M. G. Camarena (EDS). Memoria del Primer Simposium Internacional de Biocombustibles en Guanajuato (memoria electrónica). INIFAP-Universidad de Guanajuato. México, s/p.

- Raveendran T. S. 2006. Sweet sorghum. Centre for Plant Breeding and Genetics. Tamil, India. [Portal electrónico consultado el 22 de julio de 2009, <http://www.tnau.ac.in/tech/swc/sweetsorghum.pdf>]
- Sanjuán Dueñas, R.; J. Anzaldo Hernández y J. Vargas Radillo. 2007. El bagazo de la caña de azúcar: fuente de energía. *Claridades Agropecuarias*. 163:13-20.
- SAS (Statistical Analysis System). 1989. Versión 8. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Serna S. S. 2007. Bioetanol en el Noreste de México. Taller práctico sobre energía renovable. [Portal electrónico consultado el 12 de septiembre de 2008, www.ine.gob.mx]
- Siri Prieto G.; O. Ernst, M. Martínez y S. Albano. 2006. Productividad del sorgo dulce para la producción de etanol según variedad, época de siembra y población en el Noroeste uruguayo. [Portal electrónico consultado el 22 de julio de 2009, <http://www.iica.org.uy/data/documentos/261234.pdf>]
- Siri Prieto, G.; O. Ernst; L. Terzaghi; D. Gondolfo y J. Mosqueira. 2008. Sorgo dulce para la producción de etanol en el Uruguay. Jornada de difusión de resultados de investigación en producción porcina. CRS, Facultad de Aronomía. [Portal electrónico consultado el 16 de julio de 2008, <http://www.fagro.edu.uy/~suinos/jornadas/set08/3-20ExpSgDenprodetanol-20Siri.pdf>]
- Undersander D, J.; W. E. Lueschen; L.H. Smith; A.R. Kaminski; J.D. Doll; K.A. Kelling; and E.S. Oplinger. 1990. Sorghum for syrup. *Alternative Field Crops Manual*. University of Minnesota Extension Service. Center for alternative Plant & Animal Products. [Portal electrónico consultado el 21 de julio de 2009, <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/syrup.html>]
- Valenzuela B, J. R.; L. M. Coronado; X. M. Ochoa y A. Borbón. 2008. Remolacha y sorgo dulce, opciones para la producción de bioetanol. In: Torres L., E.; V. Pecina; S. Montes; M. Hernández; J. M. Arreola; J. T. Frías; V. Fernández; O. L. Rivas; V. J. Hernández; G. León y M. G. Camarena (EDS). *Memoria del Primer Simposium Internacional de Biocombustibles en Guanajuato* (memoria electrónica). INIFAP-Universidad de Guanajuato. México, s/p.