



Original Article/Artículo Original

Evaluation of theoretical ethanol production from forage sorghums (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Sinaloa, Mexico

Evaluación de la producción teórica de etanol de sorgos forrajeros (*Sorghum bicolor* L. Moench) en Sinaloa, México

Moreno-Hernández J. M.¹, Moreno-Gallegos T.¹, López-Guzmán J. A.¹

¹INIFAP-CIRNO, Campo Experimental Valle de Culiacán, Carr. Culiacán-El Dorado Km 16.5
C.P. 80000, Culiacán, Sinaloa.

Cite this paper/Como citar este artículo: Moreno-Hernández J. M., Moreno-Gallegos T., López-Guzmán J. A. (2018). Evaluation of theoretical ethanol production from forage sorghums (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Sinaloa, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 5(nesp2), e483. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.05.nesp.e483>



ABSTRACT

Sorghum is an emerging energetic crop for biofuel production under a sustainable approach, therefore assessments are required to identify varieties with adequate biomass production, juice quality and ethanol efficiency. In this research, commercial (Costeño-201, Fortuna, Gavatero-203, Matinal, Perla-101, RB-Paloma and Sinaloense-202) and experimental (Dulce, Mazatlan-16 and Variedad-2) varieties of forage sorghum were established under irrigation conditions in Sinaloa (plot located at 24°37' 57.1" N and 107°26' 32.3" O with an elevation of 19 m above sea level) to evaluate its period of industrial use (PIU), biomass efficiency and theoretical ethanol production. The varieties sowed during 2015-2016 autumn-winter cycle in Sinaloa showed a maximum solid content in juice higher than 11 °Brix, when going from flowering stage to soft-dough grain stage, being this PIU optimum for material harvesting. The most outstanding varieties correspond to sorghum of medium and medium-late vegetative cycles, with plant height between 1.9 and 2.4 m. The statistical analysis showed differences in biomass production (LSD= 1.7 t ha⁻¹), being commercial (Fortuna, Sinaloense-202, Costeño-201 and Gavatero-203) and experimental (Dulce

RESUMEN

El sorgo es un cultivo energético emergente para la producción de biocombustibles bajo un enfoque sustentable, por lo que se requiere de evaluaciones que identifiquen variedades con adecuada producción de biomasa, calidad de jugo y rendimiento de etanol. En este trabajo se establecieron variedades comerciales (Costeño-201, Fortuna, Gavatero-203, Matinal, Perla-101, RB-Paloma y Sinaloense-202) y experimentales (Dulce, Mazatlan-16 y Variedad-2) de sorgos forrajeros bajo condiciones de riego en Sinaloa (lote ubicado en las coordenadas 24°37' 57.1" N y 107°26' 32.3" O con una elevación de 19 m sobre nivel del mar) para evaluar su periodo de uso industrial (PIU), rendimiento de biomasa y potencial de producción de etanol. Las variedades sembradas durante el ciclo otoño-invierno 2015-2016 en Sinaloa, mostraron un contenido máximo de sólidos en jugo superior a 11°Brix, al pasar de estado floración al estadio lechoso-masoso de grano, siendo este el PIU óptimo para la cosecha de los materiales. Las variedades más sobresalientes corresponden a sorgos de ciclo intermedio e intermedio tardío con desarrollo de plantas entre 1.9-2.4 m. El análisis estadístico mostró diferencias en producción de biomasa (LSD= 1.7 t ha⁻¹), siendo las variedades comerciales (Fortuna, Sinaloense-202, Costeño-201 y Gavatero-203) y experimentales (Mazatlan-16 y Variedad-2) las más sobresalientes con rendimientos superiores a 55 t ha⁻¹. Al comparar los rendimientos de etanol teórico se encontraron diferencias

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: March 23rd 2018.

Accepted/Aceptado: July 4th 2018.

Available on line/Publicado: November 27th 2018.

***Corresponding Author:** Tomás Moreno Gallegos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de Culiacán. Km. 16.5 Carretera Culiacán-El Dorado. Culiacán. Sinaloa, México. Phone: +52 (553) 871 8700 ext. 81134. E-mail: moreno.tomas@inifap.gob.mx

and Variedad-2) varieties the most outstanding with biomass efficiency higher than 55 t ha⁻¹. When comparing theoretical ethanol efficiencies, significant differences (LSD= 152.3 L ha⁻¹) were found among varieties, a theoretical ethanol production around 3,083-3,260 L ha⁻¹ was estimated in Variedad-2, Mazatlan-16 experimental sorghums; as well as Costeño-201 and Gavatero-203 commercial varieties. These results evidenced the potential of forage sorghums as an alternative energetic crop to sugarcane or maize. New sorghum materials are needed to develop a bioenergy industry in the state of Sinaloa, allowing switching towards a more sustainable energetic system in the medium term.

KEY WORDS

Biofuels, sorghum genetic improvement, theoretical ethanol

Introduction

Developing energetic alternatives to the use of fossil fuels as petroleum and its derivatives (gasoline, diesel) is a current necessity for Mexico; this situation emerges from the fluctuations in petroleum prices and crude oil reserves reduction, but also from the ecological impact entailing the immoderate use of non-renewable resources (Pérez & Venegas, 2017). With this current outlook, the interest for developing biofuels like ethanol from different crops and agricultural sub-products has emerged (Prasad *et al.*, 2007). In ethanol production, maize (*Zea mays*) and sugarcane (*Saccharum officinarum*) stand out for their large volumes of biomass production. However, the drift of these foodstuffs towards bioethanol production in Mexico, involves, in a short and medium term, important consequences in food safety, especially facing the current food deficit (Shamah-Levy *et al.*, 2017). In this context, sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) may be an alternative or supplementary raw material for bioethanol production. Bioethanol production from sorghum results attractive due to its photosynthetic efficiency, tolerance to drought, growth in saline soils, adaptability to different edaphic environments and conditions; moreover it does not belong to basic grains for human food (Almodares & Hadi, 2009). Some varieties of sweet sorghum present fast growth, high yield and sugar accumulation in the stem (Fernandes *et al.*, 2014) and its biomass may be processed by means of different technological approaches to ease its reconversion to ethanol (Partida-Sedas *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2018). According to Montes-García *et al.* (2010), in Mexico,

significativas (LSD= 152.3 L ha⁻¹) entre las variedades encontrando una producción teórica de 3,083-3,260 L ha⁻¹ para los sorgos Variedad-2, Mazatlan-16; así como las variedades Costeño-201 y Gavatero-203. Estos resultados demuestran el potencial del sorgo forrajero como cultivo energético alternativo a la caña de azúcar o el maíz. Es necesario la generación de nuevos materiales de sorgo dulce para el desarrollo de una industria de bioenergéticos en el estado que permita a mediano plazo migrar hacia un sistema energético más sustentable.

PALABRAS CLAVE

Biocombustibles, mejoramiento genético de sorgo, etanol teórico

Introducción

Desarrollar alternativas energéticas al uso de combustibles fósiles como el petróleo y sus derivados (gasolina, diésel) es una necesidad actual para México; esta situación, no solo surge por las fluctuaciones en el precio del petróleo y la disminución de las reservas del crudo, sino además por el impacto ecológico que conlleva el uso indiscriminado de estos recursos no renovables (Pérez & Venegas, 2017). Ante este panorama, ha surgido el interés por desarrollar biocombustibles como el etanol a partir de diferentes cultivos y subproductos agrícolas (Prasad *et al.*, 2007). En la producción de etanol destacan el maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) por sus grandes volúmenes de producción de biomasa, acumulación de azúcares fermentables y completa mecanización de los sistemas de producción. Sin embargo, el desvío de estos alimentos hacia la producción de bioetanol en México, involucra a corto y mediano plazo consecuencias importantes en materia de seguridad alimentaria, especialmente ante el déficit alimentario actual (Shamah-Levy *et al.*, 2017). Ante este panorama, el sorgo dulce (*Sorghum bicolor*) puede ser una materia prima alternativa o suplementaria para la producción de bioetanol. La producción de bioetanol a partir de sorgo resulta atractiva debido a su eficiencia fotosintética, tolerancia a sequía, crecimiento en suelos salinos, adaptabilidad a diferentes ambientes y condiciones edáficas; además no forma parte de los granos básicos para la alimentación humana (Almodares & Hadi, 2009). Algunas variedades de sorgo dulce presentan un rápido crecimiento, altos rendimientos y acumulación de azúcares en el tallo (Fernandes *et al.*, 2014) y su biomasa puede ser procesada mediante diferentes enfoques tecnológicos para facilitar su reconversión a etanol (Partida-Sedas *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2018). De acuerdo con Montes-García *et al.*, (2010), en México las variedades

sorghum varieties specialized for bioethanol production are scarce and therefore identifying commercial varieties presenting a good potential in yield and strengthening breeding programs is needed. Currently, genetic resources in germplasm banks are available where double purpose varieties (forage and grain) have been developed. In Sinaloa, Mexico, sorghum is a strategic crop, sowed in around 300 thousand ha in irrigation and temporal areas, highlighting forage sorghum production systems as a support to the local cattle industry (Hernández-Espinal *et al.*, 2010) however, the potential of sorghum cultivated in the region for biofuel production systems has not been explored yet. As a result, the present work aims to identify forage sorghum varieties with potential for ethanol production under irrigation conditions in the state of Sinaloa.

Materials and methods

Sorghum materials and agronomic management

Seven commercial varieties of forage sorghum Costeño-201, Fortuna, Gavatero-203, Matinal, Perla-101, RB-Paloma and Sinaloense-202, plus three experimental varieties (Dulce, Mazatlan-16 y Variedad-2) were established under irrigation conditions. Sorghum were sowed on January, 15th of 2016 in a plot located in the Agronomic Experimental Station of INIFAP in Culiacan Valley (24°37' 57.1" North latitude and 107°26' 32.3" West longitude) in Sinaloa, Mexico. The area where the study was conducted presents Bs1 climatic characteristics, vertisol (clay loam) soil type and an elevation of 19 m above sea level. Seeds were treated with Thiodicarb, Carboxamide and Sulfoxaflor before sowing according to manufacturer's recommendations. The field was fertilized with 150 kg ha⁻¹ of urea in pre-sowing (64 unities of N). Agronomic and pests management were performance according to recommendations in the guide for sorghum production in the center region of Sinaloa (Moreno-Gallegos & Hernández-Espinal, 2011). After seedlings emergence, days of flowering (when 50 % of plants present pollen production), plant height and general crop safety were recorded.

Biomass production

Biomass yield was obtained by manually harvesting a 5 m section in two central furrows of the experimental unit. Harvest was realized when plants were in soft-dough grain stage (Phase 7; P7). Weight was recorded

de sorgo especializadas para para la producción de bioetanol son escasas por lo que se necesita identificar variedades comerciales que presenten buen potencial en rendimiento y fortalecer los programas de mejoramiento genético. Actualmente se cuenta con recurso genético en los bancos de gemoplasma donde se han desarrollado variedades de doble propósito (forrajeras y de grano). En Sinaloa, México, el sorgo es un cultivo estratégico que se siembra en aproximadamente 300 mil ha en zonas de riego y temporal, destacando el sistema de producción de sorgos forrajeros como apoyo a la ganadería local (Hernández-Espinal *et al.*, 2010) sin embargo, no se ha explorado el potencial de los sorgos cultivados en la región para sistemas producción de biocombustibles. Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo la identificación de variedades de sorgo forrajero con potencial para la producción de etanol bajo condiciones de riego en el estado de Sinaloa.

Materiales y métodos

Establecimiento del cultivo y variables agronómicas

Se establecieron siete variedades comerciales de sorgo forrajero Costeño-201, Fortuna, Gavatero-203, Matinal, Perla-101, RB-Paloma y Sinaloense-202, más tres variedades experimentales (Dulce, Mazatlan-16 y Variedad-2) bajo condiciones de riego. Los sorgos fueron sembrados el 15 de enero de 2016, en un lote ubicado en Campo Experimental Valle de Culiacán del INIFAP (24°37' 57.1" latitud norte y 107°26' 32.3" longitud oeste) en Sinaloa, México. La zona donde se realizó el estudio presenta características de clima Bs1 con suelos tipo barrial con una elevación de 19 metros sobre el nivel del mar. La semilla fue tratada con Thiodicarb, Carboxamida y Sulfoxaflor antes de la siembra de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Se realizó una fertilización de fondo de 150 kg ha⁻¹ de urea en pre-siembra (64 unidades de N). Las labores de cultivo y el control de plagas se realizaron de acuerdo a las recomendaciones para el cultivo de sorgo en el centro de Sinaloa (Moreno-Gallegos & Hernández-Espinal, 2011). Después de la emergencia del cultivo, se registró los días a floración (cuando el 50 % de las plantas presenten producción de polen), altura de planta y sanidad general del cultivo.

Producción de biomasa

El rendimiento de biomasa se obtuvo al cosechar manualmente una sección de 5 m en dos surcos centrales de la unidad experimental. La cosecha se realizó cuando las plantas se encontraban en estado lechoso-masoso de grano

by means of a Mechanical Dial Hanging Scale (SALTER 235 10x model, England).

Solid content

One linear meter of plants was harvested to assess the sugar accumulation during anthesis (P6), post-anthesis (soft-dough grain; P7) and maturity (P9) sorghum phenological stages, according to the phenology described by Vanderlip & Reeves (1972). After removing foliage, the stem was manually ground to obtain juice. Juice solid content (°Brix) was recorded by means of an optic refractometer (Sper Scientific, China) with a reading range of 0-32 °Brix.

Theoretical ethanol yield

Harvested material for biomass evaluation was used to measure stem juice volume. After determining solid concentration (°Brix), theoretical ethanol yield (Ethanol_t) was estimated using the model reported by Bunphan *et al.* (2015) for yeast fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* (Equation 1). This model uses a correction in sugar content metabolizable by yeast from juice solid content, subtracting 3° Brix and adjusting sugar concentration with its specific density at 20 °C (1.05). The model also considers that only 70% of solids in juice are metabolizable sugar (A_m), from which 20 % is transformed into structural components of yeast biomass and 80 % is converted directly into ethanol with a conversion rate (T_c) of 0.53 L ethanol kg⁻¹ of sugar.

$$\text{Etanol}_t = \frac{(10 \times \text{Brix} - 3) (A_m)(R_j)(T_c)(0.8)}{\rho}$$

Where: A_m corresponds to sugar fraction metabolizable by yeast, R_j represents juice yield from the stem, T_c the conversion rate of sugar to ethanol by *S. cerevisiae* and ρ juice specific density.

Statistical analysis

A yield biomass test was established by means of a Randomized Complete Block Design with three repetitions for green forage yield variable (t ha⁻¹), where the experimental unit consists of 4 furrows of 5 m long (0.8 m distance between furrows) and a useful plot of 8 m². For ethanol theoretical yield variable (L ha⁻¹), a Randomized Complete Block Design was used with three replicates. The relationships between plant height-°Brix and plant height-biomass were estimated by means of Pearson correlation coefficient. Statistical analysis and mean comparison by Least Significant Difference (LSD Fisher) was realized with the Statistical Analysis System version 9.2 software (SAS, 2009) at α=0.05.

(Fase 7; P7). El peso fue registrado por una báscula mecánica de escala suspendida (SALTER modelo 235 10x, Inglaterra).

Contenido de sólidos

Se cosechó un metro lineal de plantas para estimar la acumulación de azúcares durante los estados fenológicos de antesis (P6), post-antesis (grano lechosomasoso; P7) y madurez (P9) de los sorgos de acuerdo a la fenología descrita por Vanderlip & Reeves (1972). Después de eliminar el follaje, el tallo fue triturado manualmente para la obtención del jugo. Se registró el contenido de sólidos del jugo (°Brix) mediante un refractómetro óptico (Sper Scientific, China) con un rango de lectura de 0-32° Brix.

Rendimiento teórico de etanol

El material cosechado para la estimación de biomasa fue utilizado para medir el volumen de jugo. Tras determinar la concentración de sólidos (°Brix) se estimó el rendimiento teórico de etanol (Etanol_t) utilizando el modelo reportado por Bunphan *et al.*, (2015) para fermentaciones con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (Ecuación 1). Este modelo utiliza una corrección en el contenido de azúcares metabolizables por la levadura a partir del contenido de sólidos en el jugo, substrayendo 3 °Brix y ajustando concentración de azúcar con su densidad específica a 20°C (1.05). El modelo también considera que sólo el 70% de los sólidos en el jugo es azúcar metabolizable (A_m), del cual un 20 % se transforma en componentes estructurales de la biomasa de levadura y 80 % se convierte directamente en etanol con una tasa de conversión (T_c) de 0.53 L etanol kg⁻¹ de azúcar.

$$\text{Etanol}_t = \frac{(10 \times \text{Brix} - 3) (A_m)(R_j)(T_c)(0.8)}{\rho}$$

Donde: A_m corresponde a la fracción de azúcar metabolizable por la levadura, R_j representa el rendimiento de jugo a partir del tallo, T_c la tasa de conversión de azúcar a etanol por *S. cerevisiae* y ρ la densidad específica del jugo.

Análisis estadístico

Se estableció un ensayo de rendimiento de biomasa mediante un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para la variable de rendimiento de forraje verde (t ha⁻¹), donde la unidad experimental constó de 4 surcos de 5 m de largo (0.8 m distancia entre surcos) y la parcela útil de 8 m². Para la variable de rendimiento teórico de etanol (L ha⁻¹) fue utilizado un diseño completo al azar con 3 repeticiones. Se estimó la relación entre altura de planta-°Brix y altura de planta-biomasa mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los análisis de estadísticos y la comparación de medias por diferencia mínima significativa

Results and discussion

Sugar variation in stem

With the purpose of evaluating the ideal phenological stage for harvesting the different varieties of sorghum cultivated under irrigation conditions in Sinaloa, soluble solid content in stem juice ($^{\circ}$ Brix) for each material was determined during the anthesis (flowering, P6), post-anthesis (soft-dough grain; P7) and maturity (P9) phenological stages. Figure 1 shows $^{\circ}$ Brix variation from anthesis until the maturity of physiological material. During flowering, materials presented a solid concentration in juice of 8.0-10.0 $^{\circ}$ Brix, while in the soft-dough grain stage, solid content ranged between 11 and 13.8 $^{\circ}$ Brix, this variation corresponds to an increase of 25 % of solids regarding flowering for materials as Costeño-201, Matinal, Gavatero-203, Mazatlan-16 and Variedad-2, in which a maximum solid content was observed. With the progression of crop to maturity stage, a reduction in juice solid content was observed (around 17 %, regarding the soft-dough grain stage), however, solid content was higher than 10 $^{\circ}$ Brix in some varieties. Different studies evidenced a fast solid accumulation (mainly sugars) in sorghum stem juice during plant physiological changes and its dependency with cultivar genotypic traits (Ratnavathi *et al.*, 2010; Davila-Gomez *et al.*, 2011). According to Almodares & Hadi (2009) non-structural carbohydrates (glucose, fructose, sucrose) are being affected during grain filling and maturity, as well, temperature photoperiod and nutritional management influence in stem sugar content. Davila-Gomez *et al.* (2011) evaluated three varieties of sweet sorghums and two forage sorghums in Northeastern Mexico under irrigation conditions, recording an average accumulation of 2 $^{\circ}$ Brix per week and reaching a maximum of 16 $^{\circ}$ Brix in the 5th week post-anthesis in all cultivars. In addition, Fernandes *et al.* (2004) reported a fast sugar accumulation in the first 40 days post-anthesis and evidenced a 30 % reduction in sugar concentration at physiological maturity of sorghum. According to these authors, economically viable ethanol production from sorghum may be achieved when crops reach their maximum solid content in juice (14-16 $^{\circ}$ Brix) or above 140 g L⁻¹ of total sugars, therefore defining the optimal time for harvesting or period of industrial use (PIU) (Fernandes *et al.*, 2014). In this context, solid variation in juice of the evaluated cultivars suggests a PIU corresponding to the step where cultivars were found in a soft-dough grain stage (around 70-85 days, depending of the variety).

(LSD Fisher) se efectuaron en el paquete Statistical Analysis System ver 9.2 (SAS, 2009) a un nivel de confianza del 95 %.

Resultados y discusión

Variación de azúcares en tallo

Con el propósito de evaluar el estado fenológico ideal para la cosecha de las diferentes variedades de sorgo cultivadas bajo condiciones de riego en Sinaloa, el contenido de sólidos solubles en el jugo del tallo ($^{\circ}$ Brix) para cada material fue determinado en los estadios fenológicos de antesis (floración, P6), post-antesis (lechoso-masoso; P7) y madurez (P9). La Figura 1 muestra la variación de $^{\circ}$ Brix desde antesis hasta la madurez fisiológica de los materiales. Durante floración, los materiales presentaron una concentración de sólidos en jugo de 8.0-10.0 $^{\circ}$ Brix, mientras que en estado lechoso masoso de grano el contenido de sólidos osciló en el rango de 11-13.8 $^{\circ}$ Brix, esta variación corresponde a un incremento del 25 % de sólidos respecto a floración para materiales como Costeño-201, Matinal, Gavatero-203, Mazatlan-16 y Variedad-2, en los cuales se observó el máximo de contenido de sólidos. Al transitar el cultivo a madurez fisiológica, se observó una disminución del contenido de sólidos en jugo (aprox. 17 % respecto al estado lechoso-masoso de grano) no obstante, el contenido de sólidos fue superior a 10 $^{\circ}$ Brix en algunas variedades. Diferentes estudios evidencian una rápida acumulación de sólidos (principalmente azúcares) en el jugo del tallo de sorgo durante los cambios fisiológicos de la planta y su dependencia con las características genotípicas del cultivar (Ratnavathi *et al.*, 2010; Davila-Gomez *et al.*, 2011). De acuerdo con Almodares & Hadi (2009) los carbohidratos no estructurales (glucosa, fructosa, sacarosa) se ven afectados durante llenado de grano y madurez del cultivo, también influyen la temperatura, fotoperíodo y manejo nutricional del cultivo. Davila-Gomez *et al.*, (2011) evaluaron tres variedades de sorgo dulce y dos forrajeras en el Noreste de México bajo condiciones de riego, registrando una acumulación promedio de 2 $^{\circ}$ Brix por semana y alcanzando un máximo de 16 $^{\circ}$ Brix en la semana 5 post-floración en todos los cultivares. Por su parte, Fernandes *et al.* (2014) reporta una rápida acumulación de azúcares en los primeros 40 días post-floración y evidencia una reducción del 30 % en la concentración de azúcares a madurez fisiológica del cultivo. De acuerdo con estos autores, la producción económicamente viable de etanol a partir de sorgo se logra cuando el cultivo alcanza su máximo contenido de sólidos en jugo (14-16 $^{\circ}$ Brix) o por arriba de los 140 g L⁻¹ de azúcares totales, definiendo así el tiempo óptimo de cosecha o periodo de uso industrial (PIU) (Fernandes *et al.*, 2014). En este contexto, la variación de sólidos en el jugo de los cultivares evaluados sugiere un PIU

Agronomic traits and biomass production

Evaluated sorghum varieties in the present study correspond to sorghum of intermediary cycle (60-64 days of flowering) excepted Matinal and Perla-101, early varieties in which pollen production in 50 % of plants is reached at 53 and 57 days post-sowing, respectively (Table 1). Differences in the vegetative cycle importantly influence in plant traits and its productive potential; materials with prolonged vegetative cycle (late sorghums) develop higher internode length, internodes numbers and increased foliar area than early sorghums (i.e. increasing the photosynthetically active surface), than contributes to sugar production and biomass construction (Zhao *et al.*, 2009). According to variance analysis, significant differences were found in biomass production among varieties. The highest biomass was recorded in intermediate-late cycle sorghums varieties

que corresponde a la etapa en que los cultivares se encuentran en estado lechoso-masoso de grano (aproximadamente 70-85 días, dependiendo de la variedad).

Comportamiento agronómico y producción de biomasa

Las variedades de sorgo evaluadas en el presente estudio corresponden a sorgos de ciclo intermedio (60-64 días a floración) excepto las variedades precoces Matinal y Perla-101, donde la producción de polen en el 50 % de plantas se alcanza a los 53 y 57 días después de la siembra, respectivamente (Tabla 1). Las diferencias en el ciclo vegetativo influyen de manera importante en las características de la planta y su potencial productivo, al prolongarse el ciclo vegetativo se incrementa el número de entrenudos, longitud de entrenudos, área foliar (i.e. superficie fotosintéticamente activa) que contribuyen a la producción azúcares y construcción de biomasa (Zhao *et al.*, 2009). De acuerdo al análisis de varianza, se encontraron

Table 1.
Agronomic traits and biomass production of forage sorghums

Table 1.
Características agronómicas y producción de biomasa de sorgos forrajeros

Variety	Days to flowering	Vegetative cycle	Plant height (m)	Biomass* (t ha ⁻¹)
Costeño-201	63	Medium	1.70	55.31 cd
Fortuna	68	Medium-late	1.95	65.01 a
Gavatero-203	62	Medium	2.04	55.62 cd
Matinal	53	Early	1.96	44.06 g
Perla-101	57	Early-medium	1.61	46.87 f
RB-Paloma	61	Medium	1.70	50.31 e
Sinaloense-202	64	Medium	1.89	64.68 a
Dulce	60	Medium	2.40	57.81 b
Mazatlan-16	62	Medium	1.63	54.68 d
Varietad-2	63	Medium	1.96	56.56 bc
C.V. (%)				4.25
LSD (t ha ⁻¹)				1.703

*Biomass correspond to forage yield for each variety. Means with different letter(s) are significantly different (at $p \leq 0.05$).

*Biomasa corresponde al rendimiento de forraje verde para cada genotipo. Medias con diferente literal son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

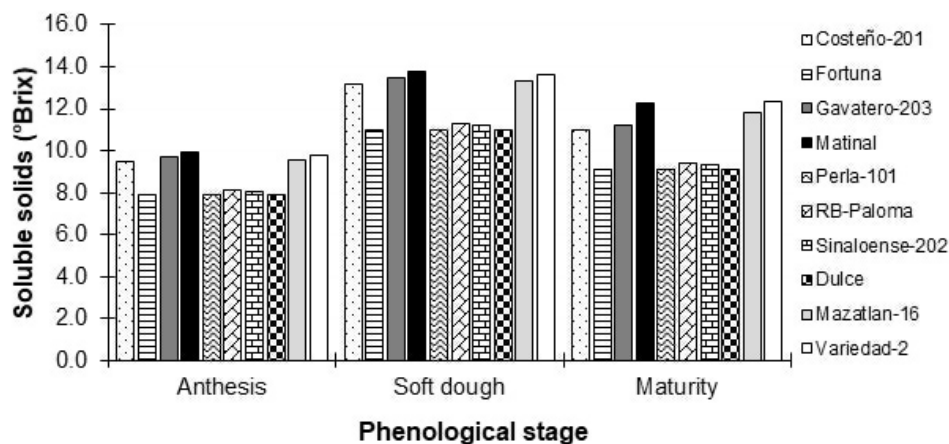


Figure 1. Variation of soluble solids in stem juice.

Phenological stages: anthesis or flowering (P6), soft dough (P7) and maturity (P9).

Figura 1. Variación del contenido de sólidos solubles en jugo del tallo.

Etapa fenológica: antesis o floración (P6), grano lechoso-masoso (P7) y madurez (P9).

Fortuna (65.01 t ha⁻¹) and Sinaloense-202 (64.68 t ha⁻¹), and the lowest one was recorded for the early sorghum Matinal (44.06 t ha⁻¹). It has been established that late flowering sorghum varieties are generally taller; when extending the maturity period, the plant develops a higher number of internodes with higher length, showing an increase in biomass production (Murray *et al.*, 2009; Burks *et al.*, 2013). Similarly, Shukla *et al.* (2017) found a positive correlation between plant height and sugar concentration, finding out that intermediate-late genotypes show sugar content in stem significantly higher than early sorghums. In this study, a positive correlation was found between plant height and biomass (Pearson coefficient $r^2=0.1093$), but not for plant height and solid content (°Brix) relation, as shown in Figure 2.

Theoretical ethanol yield of forage sorghum

With the purpose of determining ethanol potential production from sorghum juice, yield of juice extracted from the stem of vegetal material harvested in P7 stage was quantified, since sorghum in this phenological stage produce a juice with higher solid concentrations (°Brix). Stem-extracted juices have a sugar concentration (adjusted from °Brix) range between 75 and 112 g L⁻¹. Sorghums Matinal, Variedad-2, Costeño-201, Gavatero-203 and Mazatlan-16 were the most attractive materials, that showed sugar contents over 100 g L⁻¹ in stem juice (Table 2). Stem juice yield for the different forage sorghum varieties oscillated between 10,160 and 14,500 L ha⁻¹, these yields were

diferencias significativas en la producción de biomasa entre variedades. La mayor biomasa se registró en las variedades Fortuna (65.01 t ha⁻¹) y Sinaloense-202 (64.68 t ha⁻¹) de ciclo intermedio-tardío y la menor fue registrado para la variedad precoz Matinal (44.06 t ha⁻¹). Se ha establecido que variedades de sorgos de floración tardía son generalmente más altas, al extenderse el periodo madurez, la planta desarrolla un mayor número de entrenudos con mayor longitud, marcando un incremento en la producción de biomasa (Murray *et al.*, 2009; Burks *et al.*, 2013). De igual manera, Shukla *et al.* (2017) encontraron una correlación positiva entre altura de planta y concentración de azúcares, encontrando que genotipos intermedio-tardío muestran un contenido de azúcares en tallo significativamente mayor que los sorgos precoces. En este estudio, se encontró una correlación positiva entre la altura de la planta y la biomasa (coeficiente de Pearson $r^2=0.1093$), pero no para la relación entre la altura de la planta y el contenido de sólidos (°Brix), como se muestra en la Figura 2.

Rendimiento teórico de etanol de sorgos forrajeros

Con el propósito de conocer la producción potencial de etanol a partir de jugo de sorgo, se cuantificó el rendimiento de jugo extraído del tallo del material vegetal cosechado en estado P7, ya que los sorgos en esta fase fenológica producen un jugo con mayor concentración de sólidos (°Brix). Los jugos extraídos poseen una concentración de azúcares (ajustada a los °Brix) que oscila de 75-112 g L⁻¹, destacando los sorgos Matinal, Variedad-2, Costeño-201, Gavatero-203, Mazatlan-16 cuyo contenido de azúcar supera los 100 g L⁻¹ (Tabla 2). El rendimiento de jugo del tallo para las diferentes variedades

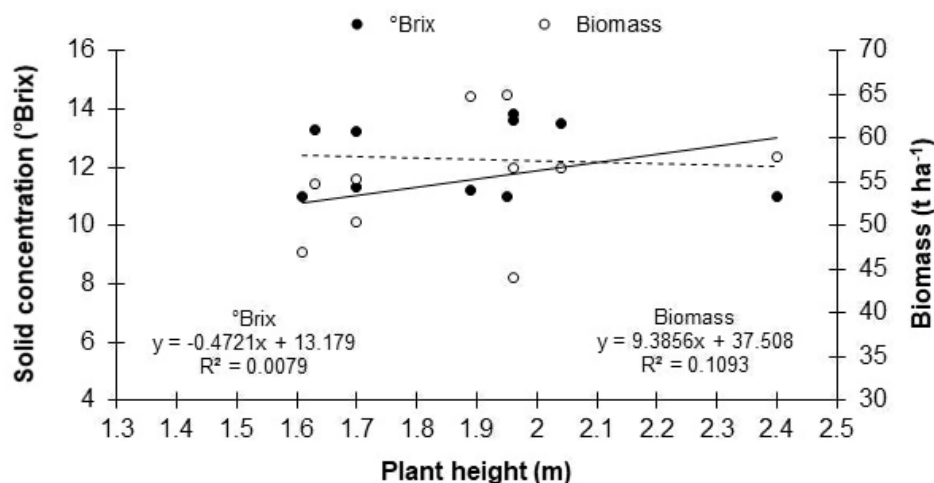


Figure 2. Correlation between plant height-solid concentration and plant height-biomass in forage sorghums. Regression lines (dotted lines for °Brix and continuous line for biomass) and Pearson correlation coefficient (R^2) for each relation are show in boxes inserted in graphic.

Figura 2. Correlación entre altura de planta-concentración de sólidos y altura de planta-biomasa en sorgos forrajeros.

Líneas de regresión (punteada para °Brix y continua para biomasa) y coeficiente de correlación de Pearson (R^2) para cada relación son mostrados en cuadros insertados en el gráfico.

lower than those reported by Dávila-Gómez *et al.* (2011), who recorded yields between 15,000 and 28,300 L ha⁻¹ for sweet sorghum varieties. For these reason, sweet sorghums have been preferred over forage or grain producing sorghums to bioethanol industry (Capecchi *et al.*, 2017). In the evaluation of theoretical ethanol yield, significant differences were found among sorghum varieties. Materials with a higher theoretical ethanol yield were Variedad-2, Gavatero-203, Mazatlan-16 and Costeño-201 with theoretical yields between 3,085 and 3,260 L ethanol ha⁻¹. The lowest theoretical ethanol yield was recorded for Perla-101 with 2115 L ethanol ha⁻¹ (Table 2). Theoretical ethanol yield in this study is comparable to ethanol productive potential estimated for maize and sugarcane crops, with volumes around 4,023 and 4,656 L ethanol ha⁻¹, respectively (Schwietzke *et al.*, 2009; Dhaliwal *et al.*, 2011). Other hand, Zhang *et al.* (2010) reported yields of 3,750-4,700 L ha⁻¹ for specialized sweet sorghum genotypes (sorghum with until 22° Brix in juice). Although ethanol experimental yield may differ from theoretical yield due to intrinsic factors during fermentation process, the different models used to estimate ethanol potential presented a high correlation ($0.93 < r < 0.95$) with real ethanol yield

forrajeras osciló entre 10,160-14,500 L ha⁻¹, estos rendimientos son inferiores a los reportados por Dávila-Gómez *et al.* (2011), quien obtuvo rendimientos de jugo entre 15,000-28,300 L ha⁻¹ para variedades de sorgo dulce. Por tales motivos, se ha dado preferencia a las variedades de sorgo dulce en la industria de bioetanol sobre aquellas productoras de grano o forrajeras (Capecchi *et al.*, 2017). Al calcular los rendimientos teóricos de etanol, se encontraron diferencias significativas entre las variedades de sorgo. Los materiales con mayor rendimiento teórico de etanol fueron Variedad-2, Gavatero-203, Mazatlan-16 y Costeño-201 con rendimientos teóricos entre 3,085 y 3,260 L ha⁻¹. El menor rendimiento teórico de etanol fue registrado para Perla-101 con 2115 L ha⁻¹ (Tabla 2). Los rendimientos de etanol teóricos en este estudio son comparables con el potencial productivo de etanol para cultivos maíz y caña de azúcar, donde se ha reportado un potencial de 4,023 y 4,656 L etanol ha⁻¹, respectivamente (Schwietzke *et al.*, 2009; Dhaliwal *et al.*, 2011). Por su parte, Zhang *et al.* (2010), reportan rendimientos de 3,750-4,700 L ha⁻¹ para sorgos dulces especializados (sorgos con hasta 22° Brix en jugo). Aunque el rendimiento experimental de etanol puede variar respecto al rendimiento teórico debido a factores intrínsecos del proceso de fermentación, los diferentes modelos utilizados para estimar el potencial de etanol han mostrado tener una

(Bunphan *et al.*, 2015), therefore represent a valid approach to evaluate both forage and grain producing sorghum. Recently, Cole *et al.* (2017) evaluated the potential of commercial sweet sorghum genotypes under irrigation conditions, obtaining theoretical yields between 5,200 and 7,200 L ethanol ha⁻¹, these yields are higher than those found in the present study. A more detailed analysis of sugar composition of the juice and its scale-up to pilot fermentative process, will allow to establish the real potential of these forage sorghum varieties for ethanol production in Sinaloa; further studies are required to quantify ethanol production from juice as well as from biomass.

Conclusion

Commercial varieties Costeño-201 and Gavatero-203; as well as experimental varieties Dulce, Mazatlan-16 and Variedad-2 of forage sorghums presented attractive plant traits, biomass and ethanol yield for biofuels production. To harvest the sorghums with highest concentration of solids and sugars in juice (>°11 Brix), the period of industrial use of materials corresponds to soft-dough grain (P7 stage) of plant development. Maximum ethanol yield calculated at the first harvest was of 3,260 L ha⁻¹ (Variety-2); nevertheless, improved yields is possible if a second harvest is

alta correlación (0.93<r<0.95) con los rendimientos reales de etanol (Bunphan *et al.*, 2015), por lo que han sido válidos para evaluaciones preliminares de sorgos forrajeros, productores de grano y sorgos dulces. Recientemente, Cole *et al.* (2017), evaluaron el potencial de materiales comerciales de sorgo dulce bajo condiciones de riego, encontrando rendimientos teóricos entre 5200 y 7200 L etanol ha⁻¹, estos rendimientos son superiores a los encontrados en el presente estudio. Un análisis más detallado de la composición de azúcares del jugo y su escalamiento a un proceso fermentativo piloto, permitirá conocer el potencial real de estas variedades de sorgo forrajero para la producción de etanol en Sinaloa; por lo que se requieren posteriores estudios para cuantificar tanto la producción de etanol del jugo como a partir de biomasa.

Conclusión

Las variedades comerciales de sorgos forrajero Costeño-201, Gavatero-203; así como las experimentales Dulce, Mazatlan-16 y Variedad-2 presentan características atractivas para ser utilizadas en la producción de biocombustibles. El periodo de uso industrial de los materiales corresponde al estado P7 lechoso-masoso de grano, para asegura la mayor concentración de sólidos y azúcares en el jugo (>11°Brix). El rendimiento máximo de etanol calculado al primer corte fue de 3260 L ha⁻¹ (Variedad-2), no obstante, es posible incrementar el rendimiento si se consideran un segundo

Table 2.
Juice yield and theoretical ethanol yield from forage sorghums

Table 2.
Rendimiento de jugo y producción teórica de etanol de sorgos forrajeros

Variety	Total sugar* (g L ⁻¹)	Juice yield (L ha ⁻¹)	Ethanol production (L ha ⁻¹)
Costeño-201	104	11,400	3,085 b
Fortuna	75	14,500	2,723 c
Gavatero-203	108	10,350	3,189 ab
Matinal	112	10,160	2,721 c
Perla-101	75	11,230	2,115 f
RB-Paloma	79	12,050	2,324 e
Sinaloense-202	78	14,480	2,782 c
Dulce	75	13,840	2,496 d
Mazatlan-16	105	11,030	3,086 b
Variedad-2	109	11,250	3,260 a
C.V. (%)			1.58

*Correspond to sugar content adjusted from °Brix in steam juice. Means with different letter(s) are significantly different (at $p \leq 0.05$).

*Corresponde al contenido de azúcares ajustados a partir de °Brix en el jugo del tallo. Medias con diferente literal son estadísticamente diferentes (a $p \leq 0.05$).

considered by material with good regrowth capacity under adequate agronomic management. Biomass production of forage sorghum may be considered for second generation ethanol production, increasing ethanol potential yield. Finally, it is necessary to encourage the sorghum breeding programs to generate new sorghum varieties with attractive plant traits to biofuel industry to facilitate the transition towards a sustainable energetic system in Mexico.

Acknowledgements

To Fundación Produce Sinaloa, A.C. for the economic support of the project entitled "**Generating technology of sorghum varieties and hybrids for seasonal and irrigation in Sinaloa**". We thank to Octavio Macías and Lorenzo Vega for their extraordinary collaboration in sorghum breeding program.

corte bajo un manejo agronómico adecuado. La producción de biomasa de sorgos forrajeros puede ser contemplada la producción de etanol de segunda generación, incrementando el rendimiento potencial de etanol. Finalmente, resulta necesario un impulso a los programas de mejoramiento genético de sorgo para la generación de nuevas variedades con mayor contenido de azúcares fermentables y rendimiento de bioetanol, que faciliten la transición hacia un sistema energético sustentable en México.

Agradecimientos

A Fundación Produce Sinaloa, A.C. por el financiamiento del proyecto "**Generación de tecnología de variedades e híbridos de sorgo para temporal y riego en Sinaloa**". Se agradece a Octavio Macías y Lorenzo Vega por su ardua colaboración en el programa de mejoramiento genético de sorgo.

References

- Ahmad Dar, R., Ahmad Dar, E., Kaur, A., and Gupta Phutela, U. (2018). Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 4070-4090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.066>
- Almodares, A. & Hadi, M.R. (2009). Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *African Journal of Agricultural Research*, 4: 772-780. <http://www.academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/6DDEDD738826>
- Bunphan, D., Jaisil, P., Sanitchon, J., Knoll, J. E. and Anderson, W. F. (2015). Estimation methods and parameter assessment for ethanol yields from total soluble solids of sweet sorghum. *Industrial Crops and Products*, 63: 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.007>
- Burks, P. S., Felderhoff, T. J., Viator, H. P., and Rooney, W. L. (2013). The influence of hybrid maturity and planting date on sweet sorghum productivity during a harvest season. *Agronomy Journal*, 105: 263-267. <https://doi.org/10.2134/agnonj2012.0317>
- Capecchi, L.; Nissen, L.; Modesto, M.; Di Girolamo, G.; Cavani, L. and Barbanti, L. 2017. Crop factors influencing ethanol production from sorghum juice and bagasse. *Energies*, 10(1): 940-955. <https://doi.org/10.3390/en10070940>
- Cole, M. R., Eggleston, G., Petrie, E., Uchimiya, S. M., and Dalley, C. (2017). Cultivar and maturity effects on the quality attributes and ethanol potential of sweet sorghum. *Biomass and Bioenergy*, 96: 183-92. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.001>
- Davila-Gomez, F. J., Chuck-Hernandez, C., Pérez-Carrillo, E., Rooney, W. L. and Serna-Saldivar, S. O. (2011). Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Industrial Crops and Products*, 33: 611-616. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.022>
- Dhaliwal, S. S., Oberoi, H. S., Sandhu, S. K., Nanda, D., Kumar, D. and Uppal, S. K. (2011). Enhanced ethanol production from sugarcane juice by galactose adaptation of a newly isolated thermotolerant strain of *Pichia kudriavzevii*. *Bioresource Technology*, 102: 5968-5975. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.015>
- Fernandes, G., Braga, T.G., Fischer, J., Parrella, R.A., Resende, M.M. and Cardoso, L. (2014). Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. *Renewable Energy*. 71: 518-524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.033>
- Hernández-Espinal, L. A., Moreno-Gallegos, T., Loaiza-Meza, A., and Reyes-Jiménez, J. E. (2010). Gavatero-203, nueva variedad de sorgo forrajero para el estado de Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1: 727-731. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342010000500013&script=sci_arttext&tlng=en

- L. A., Moreno-Gallegos, T., Jiménez-R, J. E., and Loaiza-Meza, A. (2011). Perla¹⁰¹: nueva variedad de sorgo para el estado de Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2: 779-784. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000500013&script=sci_arttext
- Montes-García, N., Pecina-Quintero, V., Cisneros-López, M. E. and García-Gracia, M. A. (2010). RB-Ceñero: sorgo dulce (*S. bicolor* Moench) para la producción de etanol. Folleto Técnico No. 43. INIFAP, Tamaulipas. Pp: 31. Disponible en: <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/2715/867.pdf?sequence=1>
- Moreno-Gallegos, T. & Hernández-Espinal, L.A. (2011). Producción de semillas de sorgo de polinización libre. SAGARPA. INIFAP, Memoria de Capacitación. Culiacán, Sinaloa, México. Pp: 24.
- Murray, S. C., Rooney, W. L., Hamblin, M. T., Mitchell, S. E., and Kresovich, S. (2009). Sweet sorghum genetic diversity and association mapping for brix and height. *The Plant Genome*, 2: 48-62. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2008.10.0011>
- Partida-Sedas, G., Montes-García, N., Carvajal-Zarrabal, O., López-Zamora, L., Gómez-Rodríguez, J. and Aguilar-Uscanga, M. G. (2017). Optimization of hydrolysis process to obtain fermentable sugars from sweet sorghum bagasse using a Box–Behnken design. *Sugar Tech*. 19: 317-325. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0461-y>
- Pérez, A. & Venegas, J. A. (2017). Producción de bioetanol en México: implicaciones socio-económicas. *Revista Internacional Administracion & Finanzas*, 10(1): 13-24. <ftp://ftp.repec.org/opt/ReDIF/RePEc/ibf/riafin/riaf-v10n1-2017/RIAF-V10N1-2017-2.pdf>
- Prasad, S., Singh, A. and Joshi, H.C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resources, Conservation and Recycling*, 50: 1-39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.007>
- Ratnavathi, C., Suresh, V. K., Kumar, B. S., Pallavi, M., Komala, V.V. and Seetharama, N. (2010). Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass and Bioenergy*, 34: 947-952. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.002>
- SAS (La Sociedad por Acciones Simplificada) Ver 9.2. 2009. Versión para windows by SAS. Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shamah-Levy, T., Mundo-Rosas, V., Flores-De la Vega, M. M., and Luiselli-Fernández, C. (2017). Food security governance in Mexico: How can it be improved? *Global Food Security*, 14: 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.05.004>
- Schwietzke, S., Kim, Y., Ximenes, E., Mosier, N. and Ladisch, M. (2009). Ethanol production from maize. In: *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*. Kriz and Larkins, eds. 347-364 pp. Berlin, Germany. Springer Berlin Heidelberg https://doi.org/10.1007/978-3-540-68922-5_23
- Shukla, S., Felderhoff, T.J., Saballos, A. and Vermerris, W. (2017). The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research*, 203: 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>
- Vanderlip, R. L. & Reeves, H. E. (1972). Growth Stages of Sorghum [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.]. *Agronomy Journal*, 64: 13-16. <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400010005x>
- Zhao, Y. L., Dolat, A., Steinberger, Y., Wang, X., Osman, A., and Xie, G. H. (2009). Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research*, 111: 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.006>
- Zhang, C., Xie, G., Li, S., Ge, L., and He, T. (2010). The productive potentials of sweet sorghum ethanol in China. *Applied Energy*, 87: 2360-2368. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.017>