








Análisis de línea x probador para estimar la aptitud combinatoria en sorgo dulce

Line tester analysis to estimate combining ability in sweet sorghum

Williams-Alanís, H.¹ , Aranda-Lara, U.^{2*} , Arcos-Cavazos, G.³ , Elizondo-Barrón, J.² , Galicia-Juárez, M.⁴ , Hernández Martínez R.² , Zavala-García, F.⁵ , López Guzmán, J.A.⁶ 

¹ Ex-Investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P 88900. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Programa de Sorgo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P 88900. ³ Ex-Investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Las Huastecas. Carretera Tampico-Cd. Mante Km. 55 Apdo. Postal C-1 Suc. Aeropuerto, Tampico, Tamaulipas, México. CP 8933. ⁴ Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera a Delta/ Oaxaca s/n. Ejido Nuevo León, Valle de Mexicali, Baja California. CP 2175. ⁵ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, (FAUANL), km 17.5 Carretera Zuazua-Marín, Marín, N. L., México. CP 66700. ⁶ Campo Experimental Valle de Culiacán, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Culiacán-Eldorado Km. 17.5 C.P.80000. Culiacán, Sinaloa, México

RESUMEN

El sorgo dulce es importante para la producción de bioetanol, el cual constituye una fuente de energía renovable, capaz de sustituir los combustibles fósiles. El objetivo del estudio fue estimar la aptitud combinatoria general (GCA) y específica (SCA), en progenitores e híbridos de sorgos dulces, para identificar los mejores para la producción de bioetanol. El experimento consistió en cinco líneas, seis probadores y los 30 híbridos posibles, sembrados en condiciones de temporal, durante el ciclo primavera-verano 2017; en el Campo Experimental Las Huastecas (INIFAP) en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La aptitud combinatoria se estimó mediante el método de línea x probador. Los resultados mostraron que las líneas; Potranca y K.CollierA, y los probadores; 3-2-1 y 4-1-1, tuvieron valores altamente significativos ($p \leq 0.01$) de GCA para: °Brix, peso total de planta, peso de tallo, peso de jugo y producción de bioetanol. Lo que indica la predominancia de los genes aditivos. Los mejores híbridos para producción de bioetanol fueron: Potranca*2-1-2, K.CollierA*3-2-1, K.CollierA*4-1-1 y Potranca*4-1-1, fueron altamente significativos ($p \leq 0.01$) en SCA para producción de bioetanol; además fueron los que presentaron los valores más altos.

PALABRAS CLAVE: Híbridos, bioetanol, aptitud combinatoria, progenitores, *Sorghum bicolor*.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Elizondo-Barrón, J., Galicia-Juárez, M., Hernández Martínez, R., Zavala-García, F., López Guzmán, J.A. (2023). Line x tester analysis to estimate combining ability in sweet sorghum. *Revista Bio Ciencias*, 10, e1518. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1518>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: May 23th 2023.

Accepted/Aceptado: November 25th 2023.

Available on line/Publicado: December 19th 2023.

*Corresponding Author:

Ulises Aranda Lara. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Programa de Sorgo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P 88900. aranda.ulises@inifap.gob.mx

ABSTRACT

Sweet sorghum is important for bioethanol production, which constitutes a renewable energy source, capable of substituting fossil fuels. This study aimed to estimate general (GCA) and specific combining ability (SCA), in parents and hybrids of sweet sorghums, to identify the best genotypes for bioethanol production. The experiment consisted of five lines, six testers, and the 30 possible hybrids, planted under rainfed conditions, during the spring-summer 2017 cycle; at Las Huastecas Experimental Station (INIFAP) in a randomized complete block experimental design with three replicates. Combining ability was estimated using the Line X Tester Analysis. Obtained results showed that lines; Potranca and K.CollierA, and testers; 3-2-1 and 4-1-1 had highly significant values ($p \leq 0.01$) of GCA for °Brix, total plant weight, stem weight, juice weight, and bioethanol production. This indicates the predominance of additive genes. For bioethanol production, the best hybrids were: Potranca*2-1-2, K.CollierA*3-2-1, K.CollierA*4-1-1, and Potranca*4-1-1, which are highly significant ($p \leq 0.01$) in SCA for bioethanol production; also, they are the ones that presented the highest values.

KEY WORDS: Hybrids, bioethanol, combining ability, parents, *Sorghum bicolor*.

Introducción

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) se produce a nivel mundial alrededor de 60.4 Mton el cual es utilizado como fuente de alimento humano, forraje para los animales, fibra, y combustible (SIAP, 2020). El aumento de los precios del mercado mundial de los combustibles fósiles, la creciente demanda y la inestabilidad en las regiones productoras, hacen a los combustibles renovables económicamente viables (Khawaja *et al.*, 2014). Mientras las fuentes de energía fósiles se agotan rápidamente, es indispensable la búsqueda de diferentes opciones para solventar dicho problema. La biomasa vegetal es una favorable fuente de energía renovable, que se puede utilizar para la producción energética, que complementa la de los combustibles fósiles (Pabendon *et al.*, 2017; Ratnavathi *et al.*, 2010). El sorgo dulce ha sido desarrollado para la producción de jugo, en lugar de grano. Se ha identificado como un cultivo potencial de materia prima para el etanol en áreas de temporal en diferentes partes del mundo (Yücel *et al.*, 2022). Los sorgos dulces y de grano se diferencian en una serie de características importantes; incluida la producción de biomasa, la acumulación de azúcar de tallo y jugo (Kanbar *et al.*, 2021; Pabendon *et al.*, 2017). El jugo de los tallos de sorgo contiene alrededor de un 10 a un 20 % de azúcar niveles similares a los de la caña de azúcar (Rakhmetova *et al.*, 2020) y presenta una capacidad de adaptación a diferentes sistemas de producción (López-Sandín *et al.*, 2021). Se ha convertido en una materia prima prometedora, porque se puede cultivar con insumos reducidos, responde

al estrés de manera más eficiente que los cultivos tradicionales y tiene un excelente potencial de producción de biomasa (Ekefre *et al.*, 2017; Yücel *et al.*, 2022). De acuerdo con la Secretaría de Energía de México (SENER) y las bases de datos de Balance Energético Nacional, en 2021 se produjo de la energía total; 5.42 % a partir de biomasa (SENER, 2021). Ali *et al.* (2008) indican que se requiere producir nuevos cultivares de sorgo dulce con alto contenido de azúcar, en combinación con otras características agronómicas deseables.

El método de análisis de línea x probador es simple, eficiente, y es muy común utilizarlo en el mejoramiento genético de plantas (Aslam *et al.*, 2014). La aptitud combinatoria específica (SCA), refleja el efecto de los genes dominantes y epistáticos y es cuando algunas combinaciones híbridas, se expresan favorablemente o no con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores. Mientras que la aptitud combinatoria general (GCA), se define como la superioridad de un genotipo en una serie de hibridaciones y es debida al efecto de los genes aditivos (Falconer, 1981; Kutlu & Sirel, 2019). En el mejoramiento genético de plantas, la estimación de los parámetros genéticos ayuda en la toma de las mejores decisiones (De la Cruz-Lázaro *et al.*, 2010). El análisis línea x probador desarrollado por Kempthorne (1957), es útil como estrategia del mejoramiento genético, para predecir la aptitud combinatoria general (GCA) de los progenitores y la aptitud combinatoria específica (SCA) de los híbridos. Además, proporciona información sobre la herencia y acción génica de los caracteres agronómicos (Arzu, 2017). Esta metodología ha sido utilizada con éxito en diversos estudios, para seleccionar los mejores progenitores e híbridos: (Aslam *et al.*, 2014; Kutlu & Sirel., 2019; Rachman *et al.*, 2022; Williams *et al.*, 2022). Los objetivos del estudio fueron estimar la aptitud combinatoria general (GCA) y específica (SCA) en progenitores e híbridos de sorgos dulces, para identificar los mejores para producción de bioetanol.

Material y Métodos

Material genético utilizado

Líneas comerciales A/B: Potranca y Kansas Collier. Líneas R: Keller. Líneas experimentales A/B 18-2-1, 11-1-1 y 14-18-1 y probadores; 3-1-2, 4-1-1, 2-1-2, 3-2-1 y TS-3-2-1. Potranca es una línea androestéril que se generó en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), a partir de Rox Orange y es progenitora del híbrido dulce Potrillo (Williams *et al.*, 2020). Rox Orange, Kansas Collier y Keller son variedades de sorgo dulce originadas en EEUU (Ali *et al.*, 2008). La línea androesteril de Kansas Collier, se formó en el año 2015, en el Campus Marín (FAUANL) al esterilizarlo con la línea 46038 originaria de Nebraska, EEUU por seis generaciones. SBB-25 es una línea de grano mantenedora de la fertilidad, originada por INIFAP, México (Williams *et al.*, 2004, Williams *et al.*, 2006). SPV 1411 variedad de sorgo dulce comercial, originada en International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, India. RTx437, línea de grano restauradora de la fertilidad, originada en la Universidad de Texas A&M EE UU (Rooney *et al.*, 2003).

Aumento del material genético

En el Campus Marín, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, durante los ciclos primavera-verano 2016 y otoño-invierno 2016-2017; se aumentaron las líneas A, B y R y los híbridos fueron formados bajo el esquema de cruce de línea x probador (5 × 6).

El experimento

La fase de campo se estableció en condiciones de temporal durante el ciclo primavera-verano (P-V) 2017 en el Campo Experimental Las Huastecas (INIFAP); localizado en Estación Cuauhtémoc, municipio de Altamira, Tamaulipas, México; Coordenadas 22° 33' LN/ 98° 09' LO, con una altura de 20 msnm. Presenta un clima (Aw0) cálido subhúmedo con lluvias en verano y lluvia invernal de 5-10 % (García, 2004); con temperatura promedio anual de 24.5 °C y de 842 mm de precipitación (INIFAP, 2015). Para determinar el comportamiento *per se* del progenitor materno, se utilizaron las líneas B o mantenedoras de la fertilidad. Consistió en las 30 combinaciones híbridas posibles, cinco líneas B mantenedoras de la fertilidad y seis líneas restauradoras incluyendo al testigo Keller. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con 41 tratamientos y tres repeticiones, en parcelas de un surco de 5 m de largo y 0.80 m de separación. La fecha de siembra fue el 13 de agosto del 2017. El manejo del experimento se realizó de acuerdo con las recomendaciones para el cultivo de sorgo dulce del INIFAP, en Tamaulipas (Montes-García *et al.*, 2013).

Toma de datos

Se tomaron datos de días a floración (DF, al 50 % de las plantas) y altura de planta (AP en cm, desde el suelo hasta el ápice de la panoja). Cuando las plantas estuvieron en la etapa siete (grano lechoso), descrita por Vanderlip (1993). Equivalente de tres a cinco semanas después de la floración, periodo en el cual las plantas alcanzaron el máximo de azúcar en el jugo del tallo (Dávila *et al.*, 2011). Se cosechó un m lineal (0.8 m²) de la parcela en competencia completa, cortando la base del tallo de 3 a 4 cm del suelo, donde se tomaron los siguientes datos (g): peso fresco total de planta (PFW), después de eliminar hojas y panícula de las plantas se obtuvo el peso fresco de tallo (SFW) y los °Brix, se obtuvieron con un refractómetro manual marca Atago. El peso seco del tallo (PST), se obtuvo al secar el peso fresco en una estufa a 65 °C por tres días. Los valores en g se transformaron a kg ha⁻¹. Los valores de peso de jugo kg ha⁻¹ y la producción teórica de bioetanol l ha⁻¹, se estimaron de acuerdo a lo descrito por Rakhmetova *et al.* (2020) al utilizar las siguientes formulas.

$$\text{Producción de jugo/kg ha}^{-1} = (\text{peso tallo fresco/kg ha}^{-1} - \text{peso tallo seco/kg ha}^{-1}) \times 0.866.$$

$$\text{Producción teórica de bioetanol/l ha}^{-1} = (\text{Brix azúcar}/100) \times (0.65 \text{ l bioetanol}/1 \text{ kg azúcar}) \times (0.85) \times (\text{peso tallo/kg ha}^{-1})$$

El análisis de aptitud combinatoria se realizó utilizando el método de prueba de línea x probador (Kempthorne, 1957). El análisis se realizó con el uso del software R (R Core Team, 2020).

Resultados y Discusión

El análisis de varianza (Tabla 1), reveló diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) entre los tratamientos, progenitores (excepto °Brix y JW) y Prog x Cru (excepto BIO) y para cruzas diferencias significativas y altamente significativas (excepto AP, y °Brix). También se encontraron diferencias altamente significativas para líneas en días a floración, peso de jugo y diferencias significativas para °Brix. Meena & Ranwah (2020), encontraron los mismos resultados para tratamientos, progenitores, cruzas, líneas y probadores para DF, AP y producción de forraje verde. Mohammed (2009), encontró diferencias significativas en sorgo forrajero en líneas para días a floración. Takare *et al.* (2014) encontró diferencias altamente significativas para línea x probador para altura de planta. Los tratamientos (genotipos) resultaron altamente significativos para las características: DF, AP, °Brix, PFW, SFW, JW y BIO. Para producción de bioetanol se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) para: tratamientos, progenitores, cruzas y probadores. Estos resultados indican la existencia de amplia base de variabilidad genética del germoplasma utilizado, lo que favorece una apropiada selección. Para líneas no se presentaron diferencias significativas lo que indica que la variabilidad en este caso fue reducida.

Aptitud combinatoria general.

Los valores de GCA para líneas se observan en la Tabla 2, donde se encontró que K.CollierA, presentó valores altamente significativos para GCA, en las variables; DF, PH, °Brix, PFW, SFW, JW y BIO. Esto coincide en reportes que indican que los sorgos dulces de ciclo tardío (Williams *et al.*, 2017; Zhang & Wang 2015), de plantas más altas (Anami *et al.*, 2015), mayor PFW, PP y JW, (Williams *et al.*, 2017), mayor peso de jugo y °Brix (Elangovan *et al.*, 2014), están asociados a una mayor producción de bioetanol. Los valores significativos de GCA están relacionados con la predominancia de genes aditivos (Kutlu & Sirel, 2019). Hussien (2015), indica que los genotipos con una adecuada GCA, presentan combinaciones genéticas favorables para la producción de híbridos. Potranca resultó con valores altamente significativos de GCA para °Brix, PFW, SFW, JW y BIO. La línea 18-2-1-1 presento valores positivos para DF, PH, SFW y JW. Para GCA los probadores; 2-1-2, 3-2-1 y 4-1-1, presentaron los mejores resultados; fueron altamente significativos para PFW, SFW, JW y BIO. Las líneas experimentales 11-1-1-1, 14-18-1-1 y 18-2-1-1 no presentaron diferencias significativas en GCA para producción de bioetanol, lo que indica que no son adecuadas para la formación de híbridos

Tabla 1. Grados de libertad y cuadrados medios del análisis de varianza de las variables agronómicas evaluadas en la prueba de línea x probador para genotipos de sorgo dulce.

S.V	DoF	DF (días)	PH (cm)	°Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (l/ha ⁻¹)
Repeticiones	2	1.195	475.71	54.18**	170983481**	122763309**	97861.06	34725.72
Tratamientos	40	20.86**	1990.88**	15.40**	75593161**	37976928**	5635646.78**	363210.88**
Progenitores	10	26.09**	4950.42**	10.82	79421811**	52542150**	3159098.04	411055.57**
Prog vs Cru.	1	152.62**	12805.97**	161.13**	1339709920**	497766710**	41846667.22**	332085.53
Cruzas	29	14.51**	597.41	11.95	30682704*	17099618*	5240973.22*	347785.99**
Líneas	4	69.87**	588.59	19.25*	42153925	27807350	10688322.78**	638287.90
Probadores	5	8.99	1128.06	25.53**	52488253*	30187703*	4062355.41	704054.94**
Líe. x Prob.	20	4.82	466.51	7.10	22937072	11686051	4446157.76*	200618.37
Error	80	2.92	389.51	8.87	22866616	10653159	2525193.26	142423.35
C.V		2.4	8.7	22.4	19.6	18.9	32.8	30.0

S.V: Fuentes de Variación; DoF: Grados de Libertad; DF: días a floración; PH: altura de planta; °Brix: contenido de azúcar en el jugo; PFW: Peso total de planta; SFW: peso de tallo; JW: peso de jugo; BIO: Producción de bioetanol; C.V: coeficiente de variación. *, **: Significativo al 0.05 y al 0.01 % de probabilidad respectivamente.

Aptitud combinatoria específica.

Los efectos de SCA se muestran en la Tabla 3, donde encontramos que, para DF, solo un híbrido presentó diferencias significativas; para la variable PH, 11 cruzas y para °Brix, solo tres cruzas. Esto demuestra que los genes de dominancia y epistasia no fueron importantes para DF y °Brix. Lo anterior coincide con lo observado para DF por Bunphan *et al.* (2015), Williams & Arcos (2015) y Williams *et al.* (2017) quienes indican que generalmente los híbridos son más precoces que sus padres. Para PFW, SFW y JW, aproximadamente la mitad de las cruzas fueron significativas y para producción de bioetanol, 11 de 30 cruzas resultaron significativas.

Los híbridos que presentaron mayores valores numéricos de producción de bioetanol: Potranca*2-1-2, K.CollierA*3-2-1, K.CollierA*4-1-1 y Potranca*4-1-1 (Tabla 3), coinciden en que tanto las líneas; Potranca y K.CollierA, como los probadores que intervienen en su formación: 2-1-2, 3-2-1 y 4-1-1, tuvieron valores significativos de GCA para: PFW, SFW, JW, y BIO (Tabla 2). Además, estos híbridos presentaron valores altamente significativos ($p \leq 0.01$) en aptitud

combinatoria específica para: PFW, SFW, JW y BIO, excepto los híbridos Potranca*3-2-1 y KCollierA* 2-1-2 (Tabla 3). Bunphan *et al.* (2015) indicaron que la utilización de híbridos, en lugar de variedades pueden ofrecer ventajas, ya que producen rendimientos similares de azúcar que sus progenitores, en menor tiempo. Además, la semilla híbrida se puede producir fácilmente y más barata a partir de plantas androfértiles; siempre y cuando sean de altura de planta más baja, lo que facilita la cosecha mecánica. Los genotipos de polinización libre que presentaron los valores *per se* más altos en producción de bioetanol, fueron los probadores 2-1-2 y 4-1-1 y fueron similares a el testigo Keller (Tabla 4). Dentro de las variedades evaluadas los dos probadores antes descritos, fueron las que presentaron los valores más altos para producción de bioetanol, y pueden utilizarse para la producción comercial. La producción de semilla a partir de variedades dulces se complica, debido a que suelen ser de altura de planta alta, lo cual dificulta la cosecha mecánica del grano y encarece los costos de producción.

Tabla 2. Valores estimados de los efectos de a SFW itud combinatoria general (GCA) para las variables agronómicas estudiadas.

	DF (días)	PH (cm)	Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (l/ha ⁻¹)
Líneas							
11-1-1-1	0.878**	-1.489	-1.407	-1186.25	-932.500	-932.874	-191.557
14-18-1-1	-2.844	-8.322	-0.062	-1764.02	-1588.05	-506.490	-132.752
18-2-1-1	0.600**	6.344**	-0.523	-27.222	173.056**	54.606**	-78.385
K.CollierA	2.322**	4.289**	1.132**	1033.194**	1209.861**	1070.953**	213.569**
Potranca	-0.956	-0.822	0.860**	1944.306**	1137.639**	313.805**	189.126**
Probadores							
2-1-2	-0.85	1.522**	-0.01	1706.389**	1310.278**	309.595**	107.904**
3-1-2	0.144	2.122**	-2.05	-3046.94	-2281.38	-1044.2	-354.12
3-2-1	0.611**	12.789**	1.091**	1633.05**	1404.444**	327.637**	186.775**
4-1-1	-0.92	-5.21	1.651**	1017.22**	713.611**	114.023**	222.164**
Keller	1.011**	-13.21	-0.60	-1263.61	-545.556	98.868**	-90.290
TS-3-2-1	0.011	1.989**	-0.07	-46.111	-601.389	194.128**	-72.434

DF: días a floración; PH: altura de planta; °Brix: contenido de azúcar en el jugo; PFW: Peso total de planta; SFW: peso de tallo; JW: peso de jugo; BIO: Producción de bioetanol. *, **: Significativo al 0.05 y al 0.01 % de probabilidad respectivamente.

Según indica Elangovan *et al.* (2014) los sorgos dulces son aquellos que presentan valores de contenido de azúcar en el jugo entre 12.4 a 24 °Brix; con lo cual excepto por el híbrido Potranca*3-2-1 que presentó un valor de 12.3 °Brix, el resto de los genotipos se encuentran dentro de esta clasificación (Tabla 4). El sorgo con menor valor de producción de bioetanol fue el probador 14-18-1-1B; el cual resultó significativamente menor que los híbridos: Potranca*2-1-2, K.CollierA*3-2-1, K.CollierA*4-1-1, Potranca*4-1-1 y el probador 4-1-1. La explicación de esta diferencia se debe a la menor altura de planta de este último material (120 cm), en relación de los demás genotipos, que presentan una altura de planta promedio mayor (213 a 260 cm). Esto coincide con lo reportado por Anami *et al.* (2015) y Williams *et al.* (2017) quienes indican que los sorgos dulces de menor altura de planta presentan menor producción de bioetanol.

Tabla 3. Estimación de los efectos de aptitud combinatoria específica (SCA) de línea x probador en las variables agronómicas evaluadas

Cruzas	DF (días)	PH (cm)	Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (l/ha ⁻¹)
11-1-1-1*2-1-2	0.189	2.089*	-1.480	-2377.917	-2120.000	860.708**	-301.247
11-1-1-1*3-1-2	-0.478	7.156**	0.800	3633.750**	2092.500**	338.221**	206.479**
11-1-1-1*3-2-1	1.056	8.156**	1.553	-625.417	90.000**	-838.817	170.076**
11-1-1-1*4-1-1	0.589	-2.178	0.960	540.417**	-269.167	-693.762	76.004**
11-1-1-1*Keller	-1.344	-14.178	-1.453	-70.417	406.667**	-162.616	-126.237
11-1-1-1*TS-3-2-1	-0.011	-1.044	-0.380	-1100.417	-200.000	496.266**	-25.075
14-18-1-1*2-1-2	0.911	-5.411	0.376	-2800.139	-2181.111	-756.427	-105.269
14-18-1-1*3-1-2	0.911	3.989**	0.256	1694.861**	1893.889**	770.620**	109.735**
14-18-1-1*3-2-1	-1.889	-3.344	0.209	-560.139	-1425.278	-2167.285	-45.360
14-18-1-1*4-1-1	-1.022	-8.678	-0.384	-777.639	-576.111	348.445**	-77.882
14-18-1-1*Keller	2.044*	15.989**	1.502	3782.361**	2783.056**	1301.766**	351.422**
14-18-1-1*TS-3-2-1	-0.956	-2.544	-1.958	-1339.306	-494.444	502.881**	-232.646
18-2-1-1*2-1-2	0.800	16.256**	-2.063	1800.556**	1778.611**	529.944**	-113.553
18-2-1-1*3-1-2	-0.533	-12.344	-0.350	-2721.111	-2346.389	-537.401	-106.924
18-2-1-1*3-2-1	0.000	8.656**	-1.397	498.889**	476.111**	118.594**	-221.227
18-2-1-1*4-1-1	1.200	-5.011	0.310	-2793.611	-1691.389	-1150.818	-120.303
18-2-1-1*Keller	-1.733	1.322	1.497	583.056**	259.444**	1469.554**	174.328**
18-2-1-1*TS-3-2-1	0.267	-8.878	2.003*	2632.222**	1523.611**	-429.873	387.680**
K.CollierA*2-1-2	-1.922	-10.022	0.714	-2151.528	-1541.528	-1558.078	-85.126

Continuación

Tabla 3. Estimación de los efectos de aptitud combinatoria específica (SCA) de línea x probador en las variables agronómicas evaluadas

Cruzas	DF (días)	PH (cm)	°Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (l/ha ⁻¹)
K.CollierA*3-1-2	-0.922	-0.289	0.294	-344.028	-774.861	-875.382	-5.561
K.CollierA*3-2-1	1.611	-19.289	1.814*	1005.139**	826.806**	1815.713**	318.852**
K.CollierA*4-1-1	-0.856	28.711**	-1.279	2225.139**	2059.306**	853.010**	49.828**
K.CollierA*Keller	1.211	3.378**	-1.026	830.972**	-277.361	-697.852	-148.891
K.CollierA*TS-3-2-1	0.878	-2.489	-0.519	-1565.694	-292.361	462.588**	-129.103
Potranca*2-1-2	0.022	-2.911	2.453**	5529.028**	4064.028**	923.854**	605.195**
Potranca*3-1-2	1.022	1.489	-1.000	-2263.472	-865.139	303.942**	-203.729
Potranca*3-2-1	-0.778	5.822**	-2.180	-318.472	32.361**	1071.795**	-222.340
Potranca*4-1-1	0.089	-12.844	0.393	805.694**	477.361**	643.125**	72.352**
Potranca*Keller	-0.178	-6.511	-0.520	-5125.972	-3171.806	-1910.853	-250.622
Potranca*TS-3-2-1	-0.178	14.956**	0.853	1373.194**	-536.806	-1031.863	-0.856

DF: días a floración; PH: altura de planta; °Brix: contenido de azúcar en el jugo; PFW: Peso total de planta; SFW: peso de tallo; JW: peso de jugo; BIO: Producción de bioetanol. *, **: Significativo al 0.05 y al 0.01 % de probabilidad respectivamente.

Tabla 4. Resultados de los mejores genotipos de sorgo dulce, evaluados en Estación Cuauhtémoc Tam., (híbridos, líneas y probadores) ciclo primavera-verano 2017.

Genealogía	DF	PH (cm)	°Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (kg/ha ⁻¹)
Potranca*2-1-2	68.0 d-h	230 a-c	15.9 a-b	35 467 a	24 996 a	6 740 a-b	2 188 a
K.CollierA*3-2-1	74.3 a-b	230 a-c	16.6 a-b	29 958 a-b	21 925 a-b	8 407 a	2 005 a-b
K.CollierA*4-1-1	70.3 b-h	260 a	14.1 a-b	30 563 a-b	22 467 a-b	7 231 a-b	1 771 a-c
Potranca*4-1-1	68.0 d-h	213 a-c	15.5 a-b	30 054 a-b	20 813 a-b	6 264 a-b	1769 a-c
4-1-1	72.0 b-e	232 a-b	15.8 a-b	25 188 a-d	19 129 a-c	4 904 a-b	1713 a-c

Continuación

Tabla 4. Resultados de los mejores genotipos de sorgo dulce, evaluados en Estación Cuauhtémoc Tam., (híbridos, líneas y probadores) ciclo primavera-verano 2017.

Genealogía	DF	PH (cm)	°Brix	PFW (kg/ha ⁻¹)	SFW (kg/ha ⁻¹)	JW (kg/ha ⁻¹)	BIO (kg/ha ⁻¹)
2-1-2	68.7 c-h	220 a-c	15.1 a-b	25 921 a-d	19 188 a-c	4 279 a-b	1593 a-d
18-2-1-1*TS-3-2-1	70.7 b-g	232 a-b	14.0 a-b	28 846 a-b	19 579 a-b	5 012 a-b	1523 a-d
K.CollierA*2-1-2	69.3 b-h	228 a-c	14.4 a-b	26 875 a-c	19 463 a-b	5 016 a-b	1522 a-d
11-1-1-1*3-2-1	72.3 b-e	252 a	13.8 a-b	26 108 a-d	19 046 a-c	3 749 a-b	1451 a-d
Potranca*3-2-1	68.7 c-h	250 a	12.3 a-b	29 546 a-b	21 058 a-b	6 906 a-b	1439 a-d
14-18-1-1*Keller	70.0 b-h	227 a-c	13.4 a-b	27 042 a-c	19 133 a-c	6 087 a-b	1414 a-d
Potranca*TS-3-2-1	68.7 c-h	248 a-b	14.2 a-b	29 558 a-b	18 483 a-c	4 669 a-b	1402 a-d
11-1-1-1*4-1-1	70.3 b-h	223 a-c	13.8 a-b	26 658 a-c	17 996 a-c	3 681 a-b	1392 a-d
TS-3-2-1	73.0 a-d	247 a-b	15.5 a-b	21 729 a-d	15 688 a-d	3 933 a-b	1383 a-d
Keller (T)	74.7 a-b	228 a-c	14.9 a-b	21 563 a-d	16 975 a-c	5 763 a-b	1366 a-d
3-2-1	74.0 a-c	245 a-b	19.7 a	15 529 b-d	12 021 b-d	3 901 a-b	1310 a-d
18-2-1-1*4-1-1	70.7 b-g	228 a-c	14.0 a-b	24 483 a-d	17 679 a-c	4 211 a-b	1309 a-d
11-1-1-1B	73.3 a-d	165 c-d	14.3 a-b	16 692 b-d	12 025 b-d	2 627 b	928 b-d
18-2-1-1B	78.0 a	184 b-d	16.3 a-b	12 304 c-d	8 646 c-d	2 068 b	776 b-d
14-18-1-1B	68.0 d-h	120 d	13.2 a-b	10 600 d	6 021 d	3 273 a-b	435 d

DF: días a floración; PH: altura de planta; °Brix: contenido de azúcar en el jugo; PFW: Peso total de planta; SFW: peso de tallo; JW: peso de jugo; BIO: Producción de bioetanol. Literales diferentes (a, b, c) en cada variable y dentro del mismo grupo denotan significancia estadística (Tukey; $p = 0.05$).

Conclusiones

Los híbridos Potranca*2-1-2, K.CollierA*3-2-1, K.CollierA*4-1-1 y Potranca*4-1-1, fueron los mejores candidatos para su posible uso en la producción de bioetanol, ya que presentaron valores altamente significativos en aptitud combinatoria específica. Los mejores híbridos fueron formados con dos líneas comerciales (Potranca y K.CollierA) y tres probadores experimentales (2-1-2, 3-2-1 y 4-1-1). Además, las líneas y probadores que intervienen en su formación, resultaron altamente significativos ($P \leq 0,01$) para aptitud combinatoria general.

Contribución de los autores

Formación del material genético; Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U. Arcos-Cavazos, G. Conceptualización del trabajo; Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U. Zavala-García, F. Desarrollo de la metodología; Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U. Hernández Martínez, R. Galicia-Juárez, M. Manejo del Software; Aranda-Lara, U. Hernández-Martínez, R. Validación experimental y análisis de resultados; Aranda-Lara, U. Hernández Martínez, R. Elizondo-Barrón, J. Williams-Alanís, H. Escritura y preparación del manuscrito; Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U. Elizondo-Barrón, J. López-Guzmán J.A. Redacción, revisión y edición; Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, Elizondo-Barrón, J. López-Guzmán J.A. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Comunidad Económica Europea a través del proyecto de investigación No. 227422 titulado: Sweetfuell Sorghum: an Alternative Energy Crop.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo recibido por el INIFAP, Campo Experimental Las Huastecas, por haber permitido establecer el experimento dentro de sus instalaciones.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

- Ali, M. L., Rajewski, J. F., Baenziger, P. S., Gill, K. S., Eskridge, K. M., & Dweikat, I. (2008). Assessment of genetic diversity and relationship among a collection of US sweet sorghum germplasm by SSR markers. *Molecular Breeding*, 21, 497-509. <https://doi.org/10.1007/s11032-007-9149-z>
- Anami, S. E., Zhang, L., Xia, Y., Zhang, Y., Liu, Z., & Jing, H. (2015). Sweet sorghum ideotypes: improvement of the biofuel syndrome. *Food and Energy Security*, 4(3), 159-177. <https://doi.org/10.1002/fes3.63>
- Arzu, K. (2017). Gene action and combining ability in line x tester population of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, 22(2), 197-203. <https://doi.org/10.17557/tjfc.356216>
- Aslam, R., Munawar, M., & Salam, A. (2014). Genetic architecture of yield components accessed

- through line × tester analysis in wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Universal Journal of Plant Science*, 2(5), 93-96. <https://doi.org/10.13189/ujps.2014.020501>
- Bunphan, D., Jaisil, P., Sanitchon, J., Knoll, J. E., & Anderson, W. F. (2015). Heterosis and Combining Ability of F1 Hybrid Sweet Sorghum in Thailand. *Crop Science*, 55(1), 178-187. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.05.0363>
- Dávila-Gómez, F. J., Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Rooney, W. L., & Serna-Saldivar, S. O. (2011). Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Industrial Crops Production*, 33(3), 611-616. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.022>
- De la Cruz-Lázaro, E., Castañón-Najera, G., Brito-Manzano, N. P., Gómez-Vázquez, A., Robledo-Torres, V., & Lozano del Río, A. J. (2010). Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Phyton*, 79(1), 11-17. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-56572010000100003&script=sci_arttext&lng=pt
- Ekefre, D. E., Mahpatra, A. K., Latimore, M. J., Belmer, D. D., Jena, U., Withehead, D. J., & Williams, A. L. (2017). Evaluation of three cultivars of sweet sorghum as feedstocks for ethanol production in the Southeast United States. *Heliyon*, 3(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00490>
- Elangovan, M., Kiran, B. P., Seetharama, N., & Patil, J. V. (2014). Genetic diversity and heritability characters associated in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Sugar Tech*, 16, 200-210. <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0262-5>
- Falconer, D. C. (1981). Introduction to quantitative genetics. 2nd edition Longman Group Ltd. New York. 133 p.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad nacional Autónoma de México. Quinta edición. México, D.F. 91 p.
- Hussien, E. H. (2015). Line x tester analysis and heterosis in grain sorghum hybrids under Arab ElAwamer conditions. Assiut Journal of Agricultural. *Sciences*, 46(4), 1-11. <https://doi.org/10.21608/AJAS.2015.537>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias [INIFAP]. (2015). Campo Experimental Huastecas. Estación Cuauhtémoc, Tamaulipas, México. <http://www.inifapcirne.gob.mx/celashuastecas.php>
- Kanbar, A., Shakeri, E., Alhajturki, D., Riemann, M., Bunzel, M., Morgano, M. T., Staff, D., & Nick, P. (2021). Sweet versus grain sorghum: Differential sugar transport and accumulation are linked with vascular bundle architecture. *Industrial Crops and Products*, 167, 113550. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113550>
- Kemphorne, O. (1957). An introduction to genetic statistics. John Wiley & Sons, Inc., N.Y. 545 p.
- Khawaja, C., Janssen, R., Rutz, D., Luquet, D., Trouche, G., Oriol, P., Reddy, B., Srinivasa, R. P., Basavaraj, G., Schaffert, R. E., Damasceno, C. M. B., Parella, R., Zacharias, A., Bushmann, R., Rettenmaier, N., Reinhardt, G., Monti, A., Zegada, L. W., Amaducci, S., & Braconnier, S. (2014). Manual del sorgo dulce: Cultivo con potencial energético. München: WIP, 67 p. ISBN 978-3-936338-31-7. <https://agritrop.cirad.fr/574768/>
- Kutlu, I., & Sirel, Z. (2019). Using line x tester method and heterotic grouping to select high yielding genotypes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, 24(2), 185-194. <https://doi.org/10.17557/tjfc.643546>
- López-Sandin, I., Zavala-García, F., Levin, L. N., Ruiz, H. A., Hernández-Luna, C. E., & Gutiérrez-

- Soto, G. (2021). Evaluation of bioethanol production from sweet sorghum variety Roger under different tillage and fertilizer treatments. *BioEnergy. Research*, 14(4), 1058-1069. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10215-7>
- Meena, B. L. & Ranwah, B. R. (2020). General and specific combining ability in dual purpose sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5), 384-391. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i5f.12254>
- Mohammed, M. I. (2009). Line x tester analysis across locations and years in Sudanese x exotic lines of forage sorghum. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 1(9), 311-319. <http://www.academicjournals.org/jpbcs>
- Montes-García, N., Vargas-Valero, E., Salinas-García, J. R., Espinoza-Ramírez, M., & Loredó-Pérez, R. (2013). Tecnología de producción de sorgo dulce para la elaboración de bioetanol para Tamaulipas. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/957.pdf>
- Pabendon, M. B., Efendi, R., Santoso, S. B., & Prastowo, B. (2017). Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2 and its equipment for bioethanol in Indonesia. In IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science*, 65(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012054>
- R. (2020). R: A Language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria. Retrieved from. <http://www.r-project.org/>
- Rachman, F., Tikoesoemaningtyas, T., Wirnas, D., & Reflinur, R. (2022). Estimation of genetic parameters and heterosis through line x tester crosses of national sorghum varieties and local Indonesian cultivars. *Biodiversitas*, 23(3), 1588-1597. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230349>
- Rakhmetova, S. O., Vergun, O. M., Blume, R. Y., Bondarchuck, O. M., Shymamanska, O. V., Tsyganskov, S. P., Yemets, A. I., Blume, Y. V., & Rakhmetov, D. B. (2020). Ethanol production potential of sweet sorghum in north and central ukraine. *The Open Agriculture Journal*, 14(1), 321-338. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010321>
- Ratnavathi, C. V., Suresh, K., Kumar, B., Vijay-Pallavi, M., Komala, V., & Seetharama, N. (2010). Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 947-952. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.002>
- Rooney, W. L., Miller, F. R., & Rooney, L. W. (2003). Registration of RTx437 sorghum parental line. *Crop Science*, 43(1), 445-447. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.4450>
- Secretaría de energía [SENER]. Balance Nacional de Energía, (2021). México. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2021
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2020). Panorama Agroalimentaria - Sorgo. <https://pubhtml5.com/vqdk/osny/Panorama-Agroalimentario-2020/>
- Takare, D. P., Ghorade, R. B., & Bagade, A. B., (2014). Combining ability studies in grain sorghum using line x tester analysis. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(10), 594-603. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143374377>
- Vanderlip, R. L. (1993). How a sorghum plant develop. Kansas Agricultural Experiment Station. Contribution No. 1203, Manhattan, Kansas, USA. 19 p.
- Williams-Alanís, H. & Arcos-Cavazos, G. (2015). Comportamiento agronómico de híbridos y progenitores de sorgo para grano en las Huastecas. *Agronomía Mesoamericana*, 26(1), 87-97. <https://doi.org/10.15517/am.v26i1.16926>
- Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Zavala-García, F., Galicia-Juárez,

- M., Rodríguez-Vázquez, M del C., & Elizondo-Barrón, J. (2022). Line x tester analysis to estimate combining ability in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrícolas UNCuyo*, 54(2): 12-21. <https://doi.org/10.48162/rev.39.078>
- Williams-Alanís, H., Montes-García, N., & Pecina-Quintero, V. (2006). Sorgo. En: Rodríguez-del-Bosque, L. A. editor, 50 años de investigación agropecuaria en el norte de Tamaulipas, historia, logros y retos. Libro técnico No. 1. INIFAP, Río Bravo, Tamaulipas, MEX. p. 33-54.
- Williams-Alanís, H., Pecina-Quintero, V., Zavala-García, F., & Montes-García, N. (2004). RB-Patrón, nuevo híbrido de sorgo para grano en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(3), 291-293. <https://doi.org/10.35196/rfm.2004.3.291>
- Williams-Alanís, H., Zavala, G. F., Arcos-Cavazos, G., Rodríguez-Vázquez, M. C., & Olivares-Sáenz, E. (2017). Características agronómicas asociadas a la producción de bioetanol en genotipos de sorgo dulce. *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 549-563. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i3.26690>
- Williams-Alanís, H., Zavala-García, F., Arcos-Cavazos, G., Rodríguez Vázquez, M. C., Olivares-Sáenz, E. & Treviño-Ramírez, E. (2020). Potrillo, nuevo híbrido de sorgo dulce para la región central de nuevo león y sur de Tamaulipas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(3), 355-356. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.355>
- Yücel, C., Yücel, D., Hatipoğlu, R. & Dweikat, I. (2022). Research on the potential of some sweet sorghum genotypes as bioethanol source under Mediterranean conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 46(2), 141-151. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.2966>
- Zhang, B., & Wang, Q. (2015). MicroRNA-based biotechnology for plant improvement. *Journal of Cellular Physiology*, 230(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/jcp.24685>