

Tolerancia a sequía y rendimiento de grano de híbridos de sorgo en el norte de Tamaulipas, México

Drought tolerance and grain yield of sorghum hybrids in northern Tamaulipas, Mexico

Jorge Elizondo-Barrón¹, Ulises Aranda-Lara¹, Héctor Williams-Alanís²

Recibido:
29/01/2024

Aceptado:
20/06/2024

Publicado:
22/06/2024

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Río Bravo, 88900, Río Bravo, Tamaulipas, México. <https://orcid.org/0000-0001-8828-6768>, <http://orcid.org/0000-0003-2885-5599>

²Ex-Investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo, 88900, Río Bravo, Tamaulipas, México. <http://orcid.org/0000-0002-7342-4723>

*Autor de correspondencia:

elizondo.jorge@inifap.gob.mx

Resumen

En el Estado de Tamaulipas, México, el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], se siembra anualmente en 1.0 millón de hectáreas, principalmente en condiciones de temporal con rendimientos bajos debido a la sequía. Para identificar híbridos de sorgo con alto rendimiento de grano bajo dos condiciones de humedad edáfica, se estableció un ensayo con 34 híbridos de sorgo (25 experimentales y nueve comerciales), en el INIFAP-Campo Experimental Río Bravo, Tamaulipas, durante el ciclo otoño-invierno 2021/2022. Se compararon dos condiciones de humedad edáfica: riego y, temporal simulado (riego presiembra). El diseño experimental fue bloques al azar con tres repeticiones, en parcelas divididas; la parcela grande para las condiciones de humedad edáfica y la subparcela para los híbridos. Con el rendimiento de grano, se calcularon los siguientes índices de selección: índice de susceptibilidad a sequía (S), diferencial de rendimiento (Dif Rend), media aritmética (Media arit), media geométrica (Media geom) e índice de eficiencia relativa (IER). El análisis de varianza

Abstract

In the State of Tamaulipas, Mexico, sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is planted annually on 1.0 million hectares, mainly under rainfed conditions with low yields due to drought. To identify sorghum hybrids with high grain yield under two soil moisture conditions, a trial with 34 sorghum hybrids (25 experimental and nine commercial), was established at the INIFAP-Río Bravo Tamaulipas Experimental Station, during the 2021/2022 autumn-winter cycle. Two edaphic moisture conditions were compared: Irrigation and simulated rainfed (pre-planting irrigation). The experimental design was a randomized complete block with three replications, in split plot; the large plot for soil moisture conditions and the subplot for hybrids. Grain yield was used to calculate: Drought susceptibility index (S), yield differential (Dif Rend), arithmetic mean (Media arit), geometric mean (Media geom), and relative efficiency index (IER). The analysis of variance revealed a significant effect between edaphic moisture conditions (21.27 % less grain yield in simulated rainfed) and a significant effect bet-

reveló un efecto significativo entre condiciones de humedad edáfica (21.27 % menos rendimiento de grano en temporal simulado) y, un efecto significativo entre híbridos. Los índices de selección, S y Dif Rend, permitieron identificar a los híbridos, RB248A*RB133 (experimental) y RB-3030 (comercial), con adaptación al temporal simulado. El índice de selección, IER permitió identificar a los híbridos RB248A*RB133 y SBA25*RB256, con alto rendimiento en ambas condiciones de humedad. Bajo dos condiciones de humedad del suelo, el mejor híbrido en rendimiento de grano fue el experimental RB248A*RB133.

ween hybrids. The selection indices, S and Dif Rend, allowed the identification of the hybrids, RB248A*RB133 (experimental) and RB-3030 (commercial), with adaptation to simulated rainfed. The selection index, IER, allowed to identify the hybrids RB248A*RB133 and SBA25*RB256, with high performance in both edaphic humidity conditions. Under two soil moisture conditions, the best hybrid in grain yield was the experimental RB248A*RB133.

Palabras clave:

Sorghum bicolor, Estrés, Índices de selección.

Key words:

Sorghum bicolor, Stress, Selection indexes.

INTRODUCCIÓN

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en México se destina para la producción de grano, así como forraje, y es la base para la formulación de alimentos balanceados en el sector pecuario. En México, en el año 2021 se sembraron 1.6 millones de hectáreas de sorgo grano, con una producción total de 4.37 millones de toneladas y un rendimiento promedio nacional de 3.37 t ha⁻¹. La superficie sembrada en ese año, se concentró principalmente en el Estado de Tamaulipas con 1.0 millón de hectáreas (62.5% del total nacional) (SIAP, 2022). Sin embargo, durante el 2021, el rendimiento promedio de sorgo en Tamaulipas fue de 2.54 t ha⁻¹, un rendimiento bajo debido principalmente a la sequía, ya que, en años con mayor precipitación y adecuada distribución de la lluvia, como en el año 2014, se sembraron en Tamaulipas un total de 974,609 ha y se obtuvo un rendimiento promedio de 3.56 t ha⁻¹ (SIAP, 2022).

El sorgo es un cultivo que presenta adaptación a los ambientes de baja precipitación y altas temperaturas (Valdés y Flores, 2009). Rajendra *et al.*, (2021), indicaron que la sequía y las altas temperaturas son los factores abióticos más importante que limitan la producción de sorgo en las regiones áridas y semiáridas del mundo. En el noreste de México, la sequía y el escaso uso de prácticas de conservación para el aprovechamiento de la humedad disponible del suelo, son los problemas más importantes del sorgo (Williams *et al.*, 2004). El Campo Experimental de Rio Bravo- INIFAP, empezó a trabajar en mejoramiento genético de sorgo en el año de 1973, generando híbridos para el noreste de México (Williams *et al.*, 2021), como son RB-2000, RB-2020, RB-3030, RB-3006, RB-4000, RB-4040, RB-Huasteco, RB-Norteño y las variedades RB-Paloma, RB-Gaviota,

RB-Williams y Arcos (Williams *et al.*, 2022).

El cambio climático ha influido en la presencia de cambios en la precipitación pluvial, tanto en cantidad como en frecuencia (Gorman, 2015). El aumento de los eventos de sequía y altas temperaturas han tenido un impacto significativo en el rendimiento de los cultivos (Galicia *et al.*, 2020). La tolerancia a la sequía es uno de los objetivos del mejoramiento genético. Sin embargo, la obtención de genotipos tolerantes a sequía se complica, por la escasez de técnicas de detección eficientes, reproducibles y rápidas, mediante las cuales se pueda identificar germoplasma tolerante. Por ello, para identificar genotipos tolerantes en condiciones de campo, se han propuesto índices o criterios de tolerancia basados en relaciones matemáticas, a partir de las diferencias del rendimiento en condiciones estresadas y no estresadas como: el índice de susceptibilidad a sequía (Fischer y Maurer; 1978, Blum *et al.*, 1991), el diferencial de rendimiento y la media aritmética (Rosielle y Hamblin, 1981), la media geométrica (Samper y Adams, 1985) y el índice de eficiencia relativa (Graham, 1984).

En frijol común, la media geométrica y el índice de eficiencia relativa, auxiliaron en la identificación de líneas con alto rendimiento en humedad favorable y adaptación en secano (Rosales *et al.*, 2000). Sio-Se Mardeh *et al.*, (2006) sugirieron que la selección para la tolerancia a la sequía en trigo podría realizarse con niveles altos de media geométrica y media aritmética, en ambientes estresados y no estresados. De acuerdo a Talebi *et al.*, (2009), la correlación significativa y positiva del rendimiento bajo condiciones normales de humedad del suelo y la media aritmética, y la media geométrica, mostró que estos índices fueron más efectivos para identificar cultivares de trigo de alto rendimiento en diferentes condiciones de humedad.

El objetivo de este estudio fue identificar híbridos de sorgo con alto rendimiento bajo condiciones variables de humedad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció el 02 de marzo, en el ciclo agrícola otoño-invierno 2021/2022, en el Campo Experimental Río Bravo, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, localizado en las coordenadas geográficas 25° 57' 54" latitud norte y 98° 01' 03" longitud oeste. El suelo corresponde a la clasificación de Rendzina, con pendiente de 0.04 %, pobre en materia orgánica, fertilidad media con deficiencias de nitrógeno y fósforo y pH superior a 7.5, la altitud del terreno a 50 msnm (Salinas *et al.*, 2006).

El experimento incluyó un total de 34 híbridos de sorgo (25 híbridos experimentales, cinco híbridos comerciales del INIFAP y, cuatro híbridos comerciales de la región, provenientes de empresas privadas). Los híbridos experimentales y comerciales del INIFAP fueron formados por el programa de mejoramiento genético de sorgo del Campo Experimental Río Bravo, mediante polinizaciones controladas a mano, durante los ciclos O-I 2020/2021 y P-V 2021. Los híbridos comerciales de las empresas privadas, fueron adquiridos con las compañías comercializadoras de semillas.

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones, en parcelas divididas, donde la parcela grande fue la condición de humedad del suelo y las subparcelas los híbridos. Las unidades experimentales consistieron de dos surcos de 5 m de longitud y 0.8 m de separación. Se sembraron 18 semillas por metro lineal (225,000 semillas por hectárea). La cosecha se realizó el día 14 de junio del 2022, cortando las panojas de 3 m lineales por surco (se evitó los extremos de cada surco). Con el rendimiento de grano ajustado al 14 % de humedad y medido en t ha⁻¹, se calcularon cinco índices de tolerancia a la sequía (Cuadro 1).

Cuadro 1.- Índices de tolerancia a la sequía usados en el experimento de 34 híbridos de sorgo bajo riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Índice | Formula* | Autor |
|------------------------------------|---|---------------------------|
| Índice de susceptibilidad a sequía | $S = [1-(RT/RR)] / [1-(\bar{R}T/\bar{R}R)]$ | Fischer y Maurer (1978) |
| Diferencial de rendimiento | Dif Rend = RR - RT | Rosielle y Hamblin (1981) |
| Media aritmética | Media Arit = $(RR + RT) / 2$ | Rosielle y Hamblin (1981) |
| Media geométrica | Media Geom = $\sqrt{RR \times RT}$ | Samper y Adams (1985) |
| Índice de eficiencia relativa | IER = $(RT/\bar{R}T)(RR/\bar{R}R)$ | Graham (1984) |

*RR=Rendimiento de grano de un genotipo en ambiente sin estrés; RT= Rendimiento de grano de un genotipo en ambiente de estrés por sequía; $\bar{R}R$ =Rendimiento de grano promedio de todos los genotipos en ambiente sin estrés; $\bar{R}T$ =Rendimiento de grano promedio de todos los genotipos en ambiente de estrés por sequía.

A la condición de humedad de riego se proporcionó el riego de asiento (lámina 15 cm), más dos riegos de auxilio (en encañe y en floración) (lámina 12 cm por riego). A la condición de temporal simulado se proporcionó únicamente el riego de asiento (lámina 15 cm).

La precipitación pluvial ocurrida y lámina de agua aplicada durante el desarrollo del experimento se muestran en el Cuadro 2, en el cual se muestra que la condición de riego recibió un total de 463 mm de agua, mientras que la condición de temporal recibió un total de 223 mm de agua.

Para demostrar la diferencia entre las dos condiciones de humedad del suelo, se determinó el porcentaje de humedad del suelo mediante el método gravimétrico (Plenecassagne *et al.*, 1997), se muestreó el suelo a los 0-10, 11-20 y 21-30 cm de profundidad, en la etapa de inicio de floración del cultivo, el día 19 de mayo de 2022, se utilizó un muestreo de cinco de oros (cinco repeticiones por cada profundidad).

Los datos se analizaron con el programa estadístico de SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2016), mediante un análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Precipitación pluvial ocurrida y volumen de agua proporcionada al experimento de 34 híbridos de sorgo bajo riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Lugar | Febrero | Marzo | Abril | | Mayo | | Volumen Total | |
|----------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|---------------|-------------|
| | Riego mm | Lluvia mm | Lluvia mm | Riego mm | Lluvia mm | Riego mm | Riego mm | Temporal mm |
| C.E. Río Bravo | 150 | 03 | 24 | 120 | 46 | 120 | 463 | 223 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza del porcentaje de humedad del suelo a diferentes profundidades, reveló un efecto significativo entre condiciones de humedad, Cuadro 3.

Cuadro 3. Análisis de varianza del % humedad del suelo a diferentes profundidades, bajo condiciones de riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Fuente | Grados de libertad | Porcentaje de humedad en el suelo | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | 0-10 cm (C.M.) | 11-20 cm (C.M.) | 21-30 cm (C.M.) |
| Bloques | 4 | 4.69 | 1.69 | 2.06 |
| Condición de humedad | 1 | 98.15* | 78.06* | 23.68* |
| R ² | | 0.87 | 0.78 | 0.79 |
| C.V. % | | 14.31 | 15.60 | 8.31 |

C.M.: Cuadrado Medio

* $P \leq 0.05$

R²: Coeficiente de Determinación

C.V: Coeficiente de Variación

En el Cuadro 4, se indica la comparación de medias del porcentaje de humedad del suelo. Se observa una reducción en el contenido de humedad del suelo para la condición de temporal simulado, en cada profundidad. Zarco *et al.*, (2005) encontraron resultados similares al trabajar con maíz y estimar la humedad del suelo a 30 cm de profundidad.

Cuadro 4.- Comparación de medias del porcentaje de humedad del suelo a diferentes profundidades bajo condiciones de riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Condición de humedad | Porcentaje de humedad en el suelo | | |
|----------------------|-----------------------------------|----------|----------|
| | 0-10 cm | 11-20 cm | 21-30 cm |
| Riego | 17.51 a | 18.27 a | 19.00 a |
| Temporal simulado | 11.24 b | 12.68 b | 15.93 b |

Literales diferentes, indican diferencia estadística significativa (Tukey; $P \leq 0.05$).

El análisis de varianza reveló un efecto significativo entre condiciones de humedad, un efecto significativo entre híbridos y, una interacción entre ambos factores (condición de humedad x híbridos) (Cuadro 5). En el Cuadro 6 se observa la comparación de medias del rendimiento de grano, en donde los híbridos bajo riego produjeron un rendimiento de grano promedio de 5.801 t ha⁻¹, en comparación a los híbridos bajo temporal con 4.567 t ha⁻¹, lo que representa una reducción de 21.27 %.

Cuadro 5. Análisis de varianza del rendimiento de grano de 34 híbridos de sorgo bajo riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Fuente | Grados de libertad | C.M. |
|--------------------------------|--------------------|----------|
| Bloques | 2 | 1.38 |
| Condición de humedad del suelo | 1 | 77.76** |
| Bloque x cond humedad | 2 | 0.35 |
| Híbridos | 33 | 142.58** |
| Cond humedad x híbridos | 33 | 73.03** |
| R ² | | 0.722 |
| C.V. % | | 17.87 |

C.M.: Cuadrado Medio

** Diferencia estadística significativa ($P \leq 0.01$)R²: Coeficiente de Determinación

C.V: Coeficiente de Variación

Cuadro 6.- Comparación de medias del rendimiento de grano de 34 híbridos de sorgo bajo riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Condición de humedad | Rendimiento de grano (t ha ⁻¹) |
|----------------------|--|
| Riego | 5.801 a |
| Temporal simulado | 4.567 b |

Literales diferentes, indican diferencia estadística significativa (Tukey; $P \leq 0.05$).

Del total de 34 híbridos de sorgo, 30 redujeron el rendimiento de grano bajo la condición de temporal simulado; y cuatro híbridos incrementaron el rendimiento de grano bajo la condición de temporal simulado (RB-3030, 83P56, RB248A*RB133, RB248*Tx437) (Cuadro 7). La interacción significativa observada entre ambos factores (Condición de humedad x híbridos) (Cuadro 5), podría ser debida a que estos cuatro híbridos obtuvieron en temporal simulado un rendimiento de grano superior al rendimiento de grano obtenido en riego.

Cuando se seleccionaron los seis mejores híbridos en rendimiento de grano, bajo los criterios de: Índice de susceptibilidad a sequía (S), diferencial de rendimiento (Dif Rend), media aritmética (Media arit), media geométrica (Media geom), índice de eficiencia relativa (IER) (Cuadro 7); al comparar sus rendimientos de grano bajo condiciones de temporal simulado, el promedio de rendimiento de los híbridos seleccionados por S y Dif rend (5.872 t ha⁻¹), fue mayor que el promedio de rendimiento de los híbridos seleccionados con base en la Media arit y Media geom (5.617 t ha⁻¹) y con base en el IER (5.776 t ha⁻¹) (Cuadros 7 y 8). Zarco *et al.*, (2005), al trabajar con tolerancia a sequía en maíz, identificaron dos líneas tolerantes al estrés hídrico, con base en el rendimiento de grano y al S. Resultados similares reportó Myo., (2011) en soya con el genotipo SJ-4, el cual obtuvo valores bajos de S y Dif rend, resultando en buenos índices para seleccionar por tolerancia a sequía.

En este estudio los índices más eficientes para seleccionar por tolerancia a sequía fueron, el S y el Dif rend. Mientras que los índices más eficientes para seleccionar por potencial de rendimiento bajo condiciones de humedad edáfica favorable fueron, la Media arit, Media geom e IER.

Cuadro 7. Rendimiento de grano (t ha⁻¹), índice de susceptibilidad a sequía, diferencial de rendimiento, media aritmética, media geométrica, índice de eficiencia relativa en respuesta a sequía de 34 híbridos de sorgo, bajo riego y temporal simulado, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| No. | Híbrido | Rendimiento (t ha ⁻¹) | | S | Dif rend | Media arit | Media geom | IER |
|-----|---------------------------|-----------------------------------|--------------|--------|----------|------------|------------|-----|
| | | Riego | Temporal | | | | | |
| 1 | 83P27 | 6.598abc | 4.801abcdefg | 1.279 | 1.797 | 5.699 | 5.628 | 1.2 |
| 2 | 83P56 | 3.413cd | 5.040abcdefg | -2.23 | -1.62 | 4.226 | 4.147 | 0.6 |
| 3 | 85P81 | 5.927abcd | 5.802abcde | 0.099 | 0.125 | 5.864 | 5.864 | 1.2 |
| 4 | G-STAR7621 | 3.011d | 1.888h | 1.751 | 1.123 | 2.449 | 2.384 | 0.2 |
| 5 | RB214A*RB128 | 5.777abcd | 5.465abcde | 0.253 | 0.312 | 5.621 | 5.618 | 1.2 |
| 6 | RB214A*RB133 | 5.923abcd | 3.529efgh | 1.898 | 2.394 | 4.726 | 4.571 | 0.7 |
| 7 | RB214A*RB256 | 5.746abcd | 4.796abcdefg | 0.776 | 0.95 | 5.271 | 5.249 | 1.0 |
| 8 | RB214A*T _x 430 | 5.383absd | 3.668cdefgh | 1.496 | 1.715 | 4.525 | 4.443 | 0.7 |
| 9 | RB214A*T _x 437 | 6.420abcd | 4.127bcdefgh | 1.677 | 2.293 | 5.273 | 5.147 | 1.0 |
| 10 | RB225A*RB128 | 5.534abcd | 2.652gh | 2.446 | 2.882 | 4.093 | 3.83 | 0.5 |
| 11 | RB225A*RB133 | 5.667abcd | 3.618cdefgh | 1.698 | 2.049 | 4.642 | 4.528 | 0.7 |
| 12 | RB225A*RB256 | 6.489abc | 3.829bcdefgh | 1.925 | 2.66 | 5.159 | 4.984 | 0.9 |
| 13 | RB225A*T _x 430 | 6.057abcd | 5.184abcdef | 0.677 | 0.873 | 5.620 | 5.603 | 1.1 |
| 14 | RB225A*T _x 437 | 5.379abcd | 4.847abcdefg | 0.464 | 0.532 | 5.113 | 5.106 | 0.9 |
| 15 | RB248A*RB128 | 7.402ab | 5.180abcdef | 1.410 | 2.222 | 6.291 | 6.192 | 1.4 |
| 16 | RB248A*RB133 | 6.373abcd | 6.790a | -0.3** | -0.41 | 6.581 | 6.578 | 1.6 |
| 17 | RB248A*RB256 | 6.697abc | 4.032bcdefgh | 1.8692 | 2.665 | 5.364 | 5.196 | 1.0 |
| 18 | RB248A*T _x 430 | 6.550abc | 5.631abcde | 0.659 | 0.919 | 6.090 | 6.073 | 1.3 |
| 19 | RB248A*T _x 437 | 5.868abcd | 6.082abc | -0.171 | -0.21 | 5.975 | 5.974 | 1.3 |
| 20 | SB12A*RB128 | 6.010abcd | 4.632abcdefg | 1.077 | 1.378 | 5.321 | 5.276 | 1.0 |
| 21 | SB12A*RB133 | 5.932abcd | 5.053abcdefg | 0.696 | 0.879 | 5.492 | 5.474 | 1.1 |
| 22 | SB12A*RB256 | 5.229abcd | 4.557abcdefg | 0.603 | 0.672 | 4.893 | 4.881 | 0.9 |
| 23 | RB-3030 | 3.934bcd | 6.053abcd | -2.530 | -2.11 | 4.993 | 4.879 | 0.8 |
| 24 | SB12A*T _x 437 | 5.248abcd | 4.305bcdefgh | 0.844 | 0.943 | 4.776 | 4.753 | 0.8 |
| 25 | SBA25*RB128 | 7.899a | 4.824abcdefg | 1.828 | 3.075 | 6.361 | 6.172 | 1.4 |
| 26 | SBA25*RB133 | 5.827abcd | 3.601defgh | 1.794 | 2.226 | 4.714 | 4.58 | 0.7 |
| 27 | SBA25*RB256 | 7.485a | 6.153ab | 0.835 | 1.332 | 6.819 | 6.786 | 1.7 |
| 28 | RB-PATRÓN | 4.807abcd | 4.278bcdefgh | 0.516 | 0.529 | 4.542 | 4.534 | 0.7 |
| 29 | RBHUASTECO | 6.970ab | 5.124abcdefg | 1.244 | 1.846 | 6.047 | 5.976 | 1.3 |
| 30 | SB22A*RB128 | 5.291abcd | 4.605abcdefg | 0.609 | 0.686 | 4.948 | 4.936 | 0.9 |
| 31 | SB22A*RB133 | 5.461abcd | 2.882fgh | 2.218 | 2.579 | 4.171 | 3.967 | 0.5 |
| 32 | SB22A*RB256 | 6.126abcd | 3.772bcdefgh | 1.804 | 2.354 | 4.949 | 4.807 | 0.8 |
| 33 | RB-3006 | 4.744abcd | 4.244bcdefgh | 0.495 | 0.5 | 4.494 | 4.487 | 0.7 |
| 34 | RB-NORTEÑO | 6.076abcd | 4.221bcdefgh | 1.434 | 1.855 | 5.148 | 5.064 | 0.9 |

S = Índice de susceptibilidad a sequía. Dif rend = Diferencial de rendimiento. Media arit = Media aritmética. Media geom = Media geométrica. IER = Índice de eficiencia relativa.

Literales diferentes, indican diferencia estadística significativa (Tukey; P ≤ 0.05).

Cuadro 8. Rendimiento promedio (t ha⁻¹) de los seis híbridos de sorgo de mejor rendimiento de grano en condiciones de temporal simulado, usando cinco criterios de selección, Río Bravo, Tamaulipas, ciclo O-I 2021/2022.

| Grupo seleccionado | Híbrido | Rendimiento promedio riego (t ha ⁻¹) | Rendimiento promedio temporal (t ha ⁻¹) |
|------------------------------------|---------------------------|--|---|
| Índice de susceptibilidad a sequía | RB-3030 | 5.215 | 5.872 |
| | 83P56 | | |
| | RB248A*RB133 | | |
| | RB248A*T _x 437 | | |
| | 85P81 | | |
| | RB214A*RB128 | | |
| Diferencial de rendimiento | RB-3030 | 5.215 | 5.872 |
| | 83P56 | | |
| | RB248A*RB133 | | |
| | RB248A*T _x 437 | | |
| | 85P81 | | |
| | RB214A*RB128 | | |
| Media aritmética | SBA25*RB256 | 7.113 | 5.617 |
| | RB248A*RB133 | | |
| | SBA25*RB128 | | |
| | RB248A*RB128 | | |
| | RB248A*T _x 430 | | |
| | RB-HUASTECO | | |
| Media geométrica | SBA25*RB256 | 7.113 | 5.617 |
| | RB248A*RB133 | | |
| | RB248A*RB128 | | |
| | SBA25*RB128 | | |
| | RB248A*T _x 430 | | |
| | RB-HUASTECO | | |
| Índice de eficiencia relativa | SBA25*RB256 | 6.929 | 5.776 |
| | RB248A*RB133 | | |
| | SBA25*RB128 | | |
| | RB248A*RB128 | | |
| | RB248A*T _x 430 | | |
| | RB248A*T _x 437 | | |

Cuadro 9. Índices de correlación de Pearson entre el rendimiento de grano de los híbridos, tanto en riego como en temporal simulado y, los índices de tolerancia a sequía calculados.

| Índice | Rendimiento en riego | Rendimiento en temporal | S | Dif Rend | Media Arit | Media Geom | IER |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------|----------|------------|------------|-----|
| Rendimiento en riego | 1.0 | | | | | | |
| Rendimiento en temporal | 0.287 | 1.0 | | | | | |
| S | 0.523** | -0.600** | 1.0 | | | | |
| Dif Rend | 0.647** | -0.544** | 0.935** | 1.0 | | | |
| Media Arit | 0.822** | 0.780** | -0.014 | 0.099 | 1.0 | | |
| Media Geom | 0.779** | 0.818** | -0.057 | 0.031 | 0.994** | 1.0 | |
| IER | 0.765** | 0.810** | -0.060 | 0.025 | 0.980** | 0.987** | 1.0 |

** Significancia al 1%

En función del índice de correlación de Pearson (Cuadro 9), el rendimiento en riego no se asoció con el rendimiento en temporal simulado, por lo cual el desempeño agronómico de los híbridos en cada condición de humedad fue independiente. El rendimiento en riego se relacionó positiva y significativamente con S, Dif rend, Media arit, Media geom, IER (Cuadro 9). Estudios con trigo determinaron también correlación positiva del rendimiento en riego con la Media arit y Media geom, Golabadi *et al.*, (2006).

El rendimiento en temporal simulado se relacionó negativa y significativamente con S y Dif rend y, positiva y significativamente con Media arit, Media geom, IER. López *et al.*, (2008) con la Media geom y el IER, seleccionaron genotipos de frijol con alto rendimiento en las dos condiciones de humedad, mientras que con el S seleccionaron los de menor reducción del rendimiento por sequía.

S se correlacionó negativa y significativamente con el rendimiento en temporal simulado y positivamente con Dif rend; resultados similares fueron reportados con sorgo (Menezes *et al.*, 2014).

La correlación positiva entre Dif rend y rendimiento en riego y la correlación negativa entre Dif rend y rendimiento en temporal simulado indica que el Dif rend es útil para seleccionar germoplasma con buen rendimiento en condiciones de temporal simulado, pero falla al seleccionar germoplasma con buen rendimiento en ambas condiciones de humedad edáfica (riego y temporal simulado); resultados similares han sido reportados en trigo y garbanzo, (Talebi *et al.*, 2009; Talebi *et al.*, 2011).

Cuadro 10. Frecuencia de aparición de los híbridos dentro del grupo de los tres más sobresalientes de acuerdo al rendimiento de grano y los índices utilizados.

| Híbrido | Rendto. riego | Rendto. temporal | S | Dif Rend | Media Arit | Media Geom | IER | Frecuencia |
|--------------|---------------|------------------|---|----------|------------|------------|-----|------------|
| 83P53 | | | * | * | | | | 2 |
| RB248A*RB128 | * | | | | | | | 1 |
| RB248A*RB133 | | * | * | * | * | * | * | 6 |
| RB248A*Tx437 | | * | | | | | | 1 |
| RB-3030 | | | * | * | | | | 2 |
| SBA25*RB128 | * | | | | * | * | * | 4 |
| SBA25*RB256 | * | * | | | * | * | * | 5 |

Al seleccionar los híbridos más sobresalientes en: Rendimiento de grano en temporal simulado, S y Dif rend (Cuadro 10), se observó que los híbridos RB248A*RB133 (experimental) y RB-3030 (comercial), obtuvieron las mayores frecuencias, tres y dos, respectivamente, debido a que RB248A*RB133, obtuvo el mayor rendimiento en temporal simulado y fue el tercer más sobresaliente en S y Dif rend; mientras que RB-3030, fue el más sobresaliente en S y Dif rend.

Al seleccionar los híbridos más sobresalientes en: Rendimiento de grano en riego, Media arit, Media geom e IER (Cuadro 10), se observó que los híbridos experimentales, SBA25*RB256 y SBA25*RB128, obtuvieron las mayores frecuencias (cuatro ambos); ya que SBA25*RB256, fue el más sobresaliente en Media arit, Media geom, IER y fue el segundo más sobresaliente en rendimiento en riego; mientras que SBA25*RB128, fue el más sobresaliente en riego y fue el tercer más sobresaliente en Media arit, Media geom e IER.

Al seleccionar los híbridos más sobresalientes tomando en cuenta el rendimiento en ambas condiciones de humedad (riego y temporal simulado), S, Dif rend, Media arit, Media geom e IER (Cuadro 10), se observó que los híbridos experimentales, RB248A*RB133 y SBA25*RB256, obtuvieron las mayores frecuencias, seis y cinco, respectivamente, debido a que obtuvieron un buen rendimiento en ambas condiciones de humedad edáfica y fueron los más sobresalientes en Media arit, Media geom e IER.

El IER de Graham (1984) permitió seleccionar híbridos que presentan alto rendimiento bajo condiciones de riego y bajo condiciones de humedad edáfica deficiente (RB248A*RB133 y SBA25*RB256), los cuales obtuvieron los IER más altos (1.7 y 1.6, respectivamente).

La combinación de criterios para seleccionar híbridos con potencial de rendimiento en condiciones de humedad edáfica favorable (Media arit, Media geom, IER) y que presenten valores de S y Dif rend, inferiores al promedio; contribuirá a seleccionar híbridos con buena adaptación y rendimiento.

CONCLUSIÓN

El estrés por sequía en la condición de temporal simulado, afectó significativamente el rendimiento de grano de los híbridos, causando una reducción del 21.27 % en relación a la condición irrigada. La selección basada en bajos niveles de S y Dif rend, permitió identificar híbridos con adaptación al temporal simulado (RB248A*RB133 y RB-3030). Por otra parte, la selección basada en IER, auxilió en la identificación de híbridos con alto rendimiento de grano en ambas condiciones de humedad edáfica (RB248A*RB133 y SBA25*RB256). Bajo dos condiciones de humedad del suelo, el mejor híbrido en rendimiento de grano fue el experimental RB248A*RB133.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA:

Conceptualización, adquisición de fondos, administración del proyecto, recursos (Aranda Lara U.); investigación, metodología, análisis de resultados (Elizondo Barrón J., Aranda Lara U., Williams Alanís H.); redacción, revisión y edición (Elizondo Barrón J., Aranda Lara U., Williams Alanís H.).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue parte del proyecto de investigación financiado por el INIFAP No. 10403734893 "Obtención de híbridos o variedades de sorgo grano para las regiones productoras de México".

LITERATURA CITADA

- Blum, A., Golan G. y Mayer J. (1991). Progress achieved by breeding open-pollinated cultivars as compared with landraces of sorghum. *Crops and Soils* 117: 307-312. <https://doi.org/10.1017/S0021859600067034>
- Fischer R. A. and Maurer R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29(5) 897 - 912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Galicia J. M., Sinagawa G. S., Gutiérrez D. A., Williams A. H., Zavala G. F. (2020). Termotolerancia en líneas de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para grano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 221-227. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1945>
- Golabadi M., Arzani A. and Maibody M. (2006). Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*. 1(5) 162 -171.
- Gorman A. O. I. (2015). Precipitation extremes under climate change. *Current climate change reports*. 1(2):49-59.
- Graham R. D. (1984). Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Adv. Plant Nutr.* 1: 57-102.
- López S. E., Tosquy V. O. H., Ugalde A. F. J., Acosta G. J. A. (2008). Rendimiento y tolerancia a sequía de genotipos de frijol negro en el estado de Veracruz. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(3): 35-39. https://doi.org/10.35196/rfm.2008.Especial_3.35
- Menezes, C. B., Ticona B. C. A., Tardin F. D., Cardoso M.J., Bastos E. A., Nogueira D. W., Portugal A. E., Santos C. V., Schaffert R. E. (2014). Selection indices to identify drought-tolerant grain sorghum cultivars. *Genetics and Molecular Research* 13 (4): 9817-9827. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1001445>
- Myo T. A. M. (2011). Physiological responses of selected soybean cultivars [*Glycine max* (L.) Merrill] under different water regimes. Ph. D. Thesis. Kasetsart University, Thailand. 157 p.
- Plenecassagne A., Romero F. E. y López B. C. (1997). Manual de laboratorio, análisis de suelos, aguas, plantas. 173 p.
- Rajendra Prasad V. B., Mahalingam Govindaraj, Maduraimuthu Djanaguiraman, Ivica Djalovic, Anjali Shailani, Nishtha Rawat, Sneha Lata Singla-Pareek, Ashwani Pareek and Vara Prasad P. V. (2021). Drought and high temperature stress in sorghum: Physiological, genetic, and molecular insights and breeding approaches. *Int. J. Mol. Sci.*, 22(18), 9826; <https://doi.org/10.3390/ijms22189826>
- Rosales Serna R., Ramírez Vallejo P., Acosta Gallegos J. A., Castillo González F. y Kelly J. D. (2000) Rendimiento de grano y tolerancia a la sequía del frijol común en condiciones de campo. *Agrociencia* 34:153-165.
- Rosielle A. A. and Hamblin J. (1981). Theoretical Aspects of Selection for Yield in Stress and Non-Stress Environment 1. *Crop Science* 21(6) 943 – 646. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Salinas G. J. R., Alvarado C. M. y Sánchez de la C. R. (2006). Suelo y Agua, pp. 147-162. En: Rodríguez del B. L. A. (ed.), *Campo Experimental Río Bravo: 50 años de investigación agropecuaria en el norte de Tamaulipas, historia, logros y retos*. Libro técnico No. 1. INIFAP, Campo Experimental Río Bravo. Río Bravo, Tam., México, 325 p.
- Samper C. and Adams M.W. (1985). Geometric mean of stress and control yield as a selection criterion for drought tolerance. *Annual Report of Bean Improvement Cooperative* 28: 53-54.
- SAS Institute. (2016). *SAS/STAT® 9.1 User'S Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- SIAP Servicio de información agroalimentaria y pesquera. (2022). Resumen nacional de la producción agrícola. Cultivo de sorgo para grano. Consultado: Octubre 2022. Disponible en <https://www.siap.gob.mx>
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi A., Poustini K., Mohammadi V. (2006). Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crop Res*, 98, 222-229.
- Talebi R., Fayaz F., Naji A. M. (2009). Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf). *Gen. Appl. Plant Physiol.* 35: 64-74. <https://www.bio21.bas.bg/ipp/gapbfiles>

- Talebi R., Baghebani N., Karami E, Ensafi M. H. (2011). Defining selection indices for drought tolerance in chickpea under terminal drought stresses. *J. Appl. Biol. Sci.* 5: 38.
- Valdés L., C.G.S. y Flores N. A. (2009). Formación de líneas de sorgo tolerantes a sequía para la sostenibilidad de los agroecosistemas Norestenses. *Agricultura Sostenible Vol. 6. Libro de Memoria. X Simposio Internacional y V Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.*
- Williams A. H., Aranda L. U., Arcos C. G., Zavala G. F., Rodríguez V. M. del C., Olivares S. E. (2021). Potencial productivo de variedades experimentales de sorgo blanco para el sur de Tamaulipas. *Nova Scientia.* 13(26): 1-19. doi: <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2688>.
- Williams A. H., Aranda L. U., Arcos C. G., Zavala G. F., Galicia J. M., Rodríguez V. M. del C., Elizondo B. J. (2022). Line x tester analysis to estimate combining ability in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Rev. FCA UNCuyo* 54(2): 12-21. <https://doi.org/10.48162/rev.39.078>
- Williams, A. H.; Pecina, Q. V.; Zavala, G. F.; Montes, G. N. (2004). RB-Patrón, nuevo híbrido de sorgo para grano en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 27(3): 291-293.
- Zarco P.E., González H. V. A., López P. M. C. y Salinas M. Y. (2005). Marcadores fisiológicos de la tolerancia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia.* 39 (5) 517-528.