

# Caracterización fenotípica de accesiones de sorgo para la adaptación a condiciones de sequía del Corredor Seco Centroamericano<sup>1</sup>

Alexandra Espinoza Ayala

alex119164@gmail.com

Raphael Wesly Colbert<sup>2</sup>

rcolbert@zamorano.edu

Profesor Asociado

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Universidad Zamorano, Honduras

Iveth Yassmin Rodriguez

irodriguez@zamorano.edu

Asistente de Investigación

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Universidad Zamorano, Honduras

Juan Carlos Rosas Sotomayor

jcrosas@zamorano.edu

Profesor Emérito

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Universidad Zamorano, Honduras

**Resumen.** Las sequías afectan de manera directa el desarrollo humano y provocan serios daños en el sector agrícola siendo más evidente en el “Corredor Seco Centroamericano”. Así mismo la producción agrícola se ve afectada por la incidencia de enfermedades y plagas. Por ello una alternativa sostenible es la producción de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], un cultivo alternativo para las condiciones mencionadas. El objetivo de la investigación fue la caracterización fenotípica bajo condiciones de estrés hídrico de un grupo de 19 accesiones de sorgo del Banco de Germoplasma de Zamorano para identificar aquellas con potencial de adaptación a la sequía para ser utilizada como variedad o como progenitor en actividades de mejoramiento genético de este cultivo. Los experimentos se condujeron durante las épocas secas (verano) del 2020 y 2021, mediante la evaluación de 19 accesiones de sorgo bajo tres condiciones de estrés hídrico: severo, moderado y sin estrés (riego normal). Las cantidades de agua de riego por goteo aplicadas en los tratamientos de estrés en el Experimento 1 fueron de 245, 304 y 401 mm, y en el Experimento 2 de 128, 171 y 316 mm, respectivamente. El rendimiento de grano y los días a floración y madurez no fueron afectados por los tratamientos de estrés hídrico en el Experimento 1, pero sí en el Experimento 2; sin embargo, las accesiones presentaron diferencias bajo los diferentes niveles de estrés en ambos experimentos. Las accesiones PCR 3-22, Blanco Tortillero, DICTA 29, PCR 1-16, CENTA RCY, Sureño y Sureño II presentaron los mayores rendimientos y la mejor tolerancia a la sequía. Se sugiere continuar con la validación en finca de las accesiones promisorias en las zonas productoras de sorgo del Corredor Seco de Honduras, para confirmar el potencial agronómico y calidad comercial mediante evaluaciones participativas con agricultores.

**Palabras clave:** Corredor seco, germoplasma, índices de selección, *Sorghum bicolor* L. (Moench), tolerancia a sequía.

## Phenotypic characterization of sorghum accessions for adaptation to drought conditions of the Central American Dry Corridor

**Abstract.** Drought affects human development and cause serious damage to the agricultural sector being more evident in the “Central American Dry Corridor”. In addition, agricultural production is affected by the incidence of diseases and pests. Therefore, a sustainable alternative is sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] production as an alternative crop for the conditions mentioned. The objective of this research was the phenotypic characterization of a group under drought stress of a group of sorghum accessions from Zamorano’s Germplasm Bank to identify

<sup>1</sup> Trabajo parcial de A. Espinoza para optar el título de Maestría en Ciencias en Agricultura Tropical Sostenible, Universidad Zamorano, Honduras.

<sup>2</sup> Autor para correspondencia.

those with potential adaptation to drought to be used as cultivar or parent in genetic improvement activities of this crop. The experiments were conducted during the dry seasons of 2020 and 2021, throughout the evaluation of 19 sorghum accessions under three drought stress conditions: severe, moderate and without stress (normal irrigation). The amounts of water applied by drip irrigation in the Experiment 1 were 245, 304 and 401 mm, and in the Experiment 2, 128, 171 and 316 mm, respectively. Seed yield and days to flowering and maturity were not affected by the drought stress treatments in Experiment 1 but were affected in the Experiment 2. However, sorghum accessions presented differences for these variables under the drought stress treatments in both experiments. The accessions PCR 3-22, Blanco Tortillero, DICTA 29, CENTA CF (rojo), PCR 3-22, CENTA RCY, Sureño y Sureño II, presented the highest yields and drought tolerance. It is suggested to continue with on-farm validation of promising accessions in sorghum producing areas from the Honduran dry corridor, to confirm the agronomic potential and commercial quality through farmer participatory evaluations.

**Keywords:** Dry corridor, germplasm, selection index, *Sorghum bicolor* L. (Moench), drought tolerance.

## Introducción

La producción agrícola en el Corredor Seco Centroamericano (CSC) es afectada por períodos frecuentes de fenómenos climáticos que ocasionan pérdidas innumerables en diversos cultivos básicos reduciendo la cantidad de alimentos disponibles para la población. Entre los eventos climáticos con más efectos negativos dentro del CSC están las sequías que se ven potenciadas por el calentamiento de las celdas de Hadley desencadenando períodos anómalos de sequía en temporadas que son usualmente lluviosas (Calvo-Solano et al. 2018; Hidalgo et al. 2019). Así mismo, el riesgo de sequías se ha incrementado con el paso de los años debido al calentamiento global amenazando a la población más vulnerable que habita el CSC.

Por otro lado, la mayoría de la población del CSC no solo se ve afectada por los efectos anómalos de la sequía, sino que también se encuentran en estado de pobreza y sufren de inseguridad alimentaria. Honduras es el país más afectado debido a los efectos de estas condiciones climáticas cambiantes y el reto de producir en tierras con malas o en condiciones de deterioro. Es así como la producción agrícola dentro del territorio hondureño se limita a la producción de cultivos de subsistencia, que sufren de los efectos negativos de la presencia de períodos de sequía. Entre los cultivos que se ven más afectados están el frijol, maíz y maicillo con pérdidas entre el 45 y 70%.

La producción con cultivos con mejor potencial de adaptación ha tomado mayor relevancia durante las últimas décadas, debido a que actualmente nos enfrentamos a efectos climáticos adversos como la sequía que son cada vez más frecuentes y que ocasionan inconvenientes en la producción agrícola. Además, el incremento poblacional obliga a productores a alimentar a un número mayor de personas y especies animales para garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial. La pérdida de alimentos ocasionada por la sequía tiene como consecuencia el incremento de la inseguridad alimentaria. Durante la primera década de este siglo las sequías ocasionaron escasez de alimentos para más de 81 millones de personas a lo largo del planeta (Damania et al. 2017).

Entre los cultivos con más cualidades adaptativas ante la sequía se encuentra el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Actualmente se encuentra entre los cinco cultivos de mayor importancia a nivel mundial y su producción por ciclo productivo es de aproximadamente 58 millones de toneladas, siendo Estados Unidos, Nigeria, Etiopía, Sudan y México los mayores productores (USDA 2021). En América Latina, los mayores productores de sorgo son México, Brasil y Argentina que producen alrededor de 8.5 millones de toneladas que representa un 16% de la producción mundial (FAOSTAT 2021).

El sorgo juega un papel importante en la dieta de la población que vive en zonas marginales al ser uno de los pocos cultivos que se logra producir, además de poseer un gran potencial nutricional (Hariprasanna y Rakshit 2016). Este cultivo logra cubrir las necesidades alimenticias de humanos como de animales ya que se pueden aprovechar los granos, tallos y hojas (Upadhyaya et al. 2016; Wang et al. 2016). De acuerdo con el USDA (2019) su contenido nutricional varía de acuerdo con la variedad, en promedio 100 g de sorgo contienen 12.4 g de agua, 721 g de carbohidratos, 10.6 g de proteínas, 6.7 g de fibras y 3.5 g de lípidos, y proporcionan aproximadamente 329 kcal.

El sorgo es un cultivo que contribuye a la seguridad alimentaria mundial, en especial en zonas vulnerables. Actualmente es uno de los cereales comerciales que presenta mejores características para soportar los efectos de la sequía (Deshpande et al. 2016). El sorgo puede desarrollarse en condiciones

adversas con climas calientes, ya que puede tolerar entornos con temperaturas entre los 20 y 40 °C. Además, el cultivo de sorgo es más eficiente en el uso de agua comparado con otros cultivos comerciales como el trigo o maíz (Colazo y Garay 2012; Wagaw 2019). Estas características hacen que el sorgo sea un cultivo ideal para zonas que tienden a sufrir los efectos frecuentes de la sequía.

Fisiológicamente el sorgo pertenece a un grupo de plantas denominado C4, debido a la cantidad de carbono atmosférico que logran fijar en el proceso fotosintético. Esta característica fisiológica permite que las plantas de sorgo fijen más carbono empleando menos agua en la fotosíntesis, comparado con plantas con diferentes mecanismos fotosintéticos, lo que hace que este cultivo sea más eficiente en ambiente secos y calientes. Adicionalmente, sus estomas se cierran ante la presencia de algún nivel de estrés hídrico, lo que ocasiona la disminución de la transpiración y fotorrespiración (Ghannoum 2009; Christin y Osborne 2014). Estas características evitan la pérdida de agua que sumada a la concentración de temperaturas altas provocan una disminución en el contenido de clorofila por el cambio estructural que se presenta en los cloroplastos (Wagaw 2019). Otros factores como la senescencia y el acame también están directamente asociados a la deficiencia en la actividad fotosintética de la planta, y estas se agravan con la falta de agua que se presenta en determinados lugares y épocas por la presencia de la sequía (Kapanigowda et al. 2013).

El desarrollo morfológico del sorgo es otro factor importante que permite a este cultivo tolerar la sequía. El ciclo fenológico juega un papel importante en la adaptación y tolerancia a la sequía, ya que cada etapa posee una duración diferente. Una de las etapas más importantes es la floración y su identificación es crítica, debido a que tiene relación directa con el rendimiento (Mutava et al. 2011; Tuberosa 2012; Kapanigowda et al. 2013). Durante la etapa de la floración hasta la post floración, el sorgo es especialmente susceptible a los efectos de la sequía, porque es el periodo donde se puede presentar un mayor requerimiento hídrico, ya que el rendimiento depende del tiempo en que se logren formar los granos y la velocidad de formación depende del escape y los efectos de la sequía sobre el resto de la planta (Tuinstra et al. 1997; Assefa et al. 2010; Upadhyaya et al. 2017). Estos inconvenientes se ven reflejados en los productos finales como son el rendimiento de grano y la calidad de forraje debido a que el sorgo es un cultivo de doble propósito.

De acuerdo con Mutava et al. (2011), los diferentes cultivares de sorgo responden de manera distinta al impacto de la sequía y esto influye en el rendimiento final que se obtiene de la producción de sorgo. Algunos autores como Menezes et al. (2014) y Upadhyaya et al. (2017), señalan la importancia de utilizar los índices de sequía para la identificación de variedades más tolerantes. Los índices como la media geométrica, el índice de susceptibilidad y el índice de tolerancia al estrés, son los más eficientes al momento de determinar qué variedad presenta mayor tolerancia a este estrés. A partir de estos índices se puede conocer la eficiencia fenotípica de las distintas variedades. No obstante, la intensidad del daño ocasionado por la sequía sobre el rendimiento es muy variada, ya que depende de la variedad y la presión ambiental.

La producción agrícola de granos básicos es la más afectada en diferentes regiones como es el caso de Honduras, donde la población rural tiene como único medio de vida la producción de granos básicos como maíz, frijol y en menor escala sorgo. No obstante, la disminución de las lluvias ocasiona que se pierda entre el 45% y 70% de estos cultivos, y también causa el deterioro de las tierras aptas para la agricultura. Esto repercute de manera negativa en la socioeconomía del país y de la población (Nelson et al. 2009; Echeverría 2016). En este sentido, el sorgo es una alternativa de producción, tanto por su valor económico a nivel mundial como por sus características productivas en ambientes como los del CSC.

De acuerdo con la caracterización del CSC realizada por van der Zee et al. (2012), el 80% de la alimentación de la región proviene del sector rural, donde aproximadamente el 60% de la población vive en condiciones de pobreza. La sequía ocasiona hasta el 75% de pérdidas de la producción agrícola en el CSC, debido al deterioro de las zonas productivas y a la reducción de agua para riego (OCHA 2020). Por tal motivo, más de 1.4 millones de personas sufren de inseguridad alimentaria y requieren de algún tipo de apoyo socioeconómico. Uno de los países dentro del CSC que más sufre los efectos de la sequía es Honduras, porque se estima que 42.1% del CSC forman parte del territorio hondureño y las características climáticas típicas del CSC afectan a los municipios en el sur del país dejando a más de 461,000 personas en inseguridad alimentaria (Bonilla, 2014; FAO, 2017), siendo los más perjudicados los productores de cultivos de subsistencia.

Encontrar cultivos capaces de mantener su productividad pese a las condiciones adversas se ha hecho una necesidad, y el sorgo posee el potencial de adaptarse a las condiciones hostiles. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar un grupo de accesiones de sorgo del Banco de Germoplasma de Zamorano bajo diferentes niveles de estrés de sequía, para identificar accesiones con un valor potencial como variedad o para ser utilizadas en el mejoramiento genético de sorgo emprendido por la Unidad de Investigación y Desarrollo de Cultivos de Zamorano, cuya meta es el desarrollo de variedades de sorgo de amplia adaptación y productividad como cultivo alternativo para garantizar la seguridad alimentaria y nutricional de los pobladores del CSC y el resto de Centro América.

## Materiales y métodos

En la presente investigación se evaluaron 19 accesiones de sorgo conservadas en el Banco de Germoplasma de Zamorano, provenientes de Honduras, Nicaragua, El Salvador y Burkina Faso. La colección evaluada incluye variedades mejoradas por entidades como el Programa Internacional de Sorgo y Mijo (INTSORMIL, por sus siglas en inglés), el Centro Nacional de Tecnología Agrícola (CENTA) de El Salvador y la Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA) (Morán y Villeda 2012a). La variedad de sorgo “Sureño” fue empleada como testigo, por ser una variedad conocida y utilizada por agricultores en Honduras y otros países, que se adapta bien a ambientes calientes y secos (Morán y Villeda 2012b).

La investigación fue realizada en lotes experimentales de la Zona II de la Universidad Zamorano, ubicado a 14°00'23"12" LN y 86°56'35"16" LO, a una altura de 800 msnm, que presenta una temperatura promedio anual de 24 °C y una precipitación promedio anual de 1,100 mm. El lote experimental es un suelo alfisol lithic haplustalf de textura franca, pH 5.8, 2.3% materia orgánica, 0.12% de N total, 279 mg/kg de fósforo, 619 mg/kg de potasio, 1,753 mg/kg de calcio, 235 mg/kg de Mg y 122 mg/kg de sodio (extractables). Los experimentos se llevaron a cabo durante dos siembras en épocas de verano, el Experimento 1 de febrero a mayo del 2020 y el Experimento 2 de diciembre del 2020 a abril del 2021. En ambas temporadas se empleó un arreglo de parcelas divididas de un diseño de bloques incompletos con cuatro repeticiones. Los tres tratamientos de estrés hídrico, sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE) se distribuyeron en las parcelas y las 19 accesiones en las sub-parcelas.

Para asegurar un establecimiento uniforme las accesiones de sorgo se sembraron en bandejas de germinación y fueron trasplantadas a campo a los 10 días después de la siembra (DDS), en parcelas experimentales de un surco de 5 m de largo con distancias entre plantas de 0.25 m y entre surcos de 0.9 m. Se realizaron tres aplicaciones de los fertilizantes inorgánicos, urea, fosfato monoamónico y cloruro de potasio (12-24-12), a los 10, 30 y 45 días después del trasplante, dicha fertilización fue basada en las dosis propuestas por Zeledón et al. (2007). Para la implementación de los tratamientos de estrés se empleó un sistema de riego por goteo. En el Experimento 1 y a partir del trasplante, el tratamiento de estrés SS recibió 245.27 mm hasta la etapa de panoja embuchada (V5); en el estrés SM 304.16 mm hasta la etapa de grano lechoso (R7); y en el tratamiento SE 401.2 mm hasta la madurez fisiológica (R9). En el Experimento 2 se aplicaron 128.2 mm en SS, 170.8 mm en SM y 315.5 mm en SE, desde el trasplante hasta las etapas indicadas para cada estrés hídrico.

Las variables evaluadas en ambos experimentos fueron aquellas sugeridas para ensayos de tolerancia a sequía (Upadhyaya et al, 2017), las que se comenzaron a registrar a partir de la etapa R5 hasta la cosecha. Las variables evaluadas incluyeron días a floración (>50% plantas con panoja) y días a madurez fisiológica (>50% plantas con grano maduro). La clorofila relativa se midió en la etapa reproductiva R7 con el equipo MultispeQ V 2.0 (PhotosynQ Inc.) en la hoja bandera (Kuhlgert et al. 2016). La senescencia foliar se registró según la escala 1-10 (1= 0 hojas muertas; 10= 100% hojas muertas) modificada de Muñoz et al. (1993). La altura de planta (cm) se midió de la superficie del suelo al ápice la panoja en la etapa R7. La tasa de macollamiento se estimó mediante la relación del número de hijos/m<sup>2</sup> y plantas /m<sup>2</sup> (TM =NH/NP). Después de la cosecha se determinaron la longitud de la panoja, rendimiento de grano y peso de 100 semillas. El índice de susceptibilidad al estrés (ISE), se determinó mediante la ecuación [1]:

$$ISE = [1 - (RG_{ass}/RG_{ase}) / (1 - (RG_{pss} - RG_{pse}))] \quad [1]$$

Donde  $RG_{ass}$  y  $RG_{ase}$  son los rendimientos de grano de cada accesión y  $RG_{pss}$  y  $RG_{pse}$  los rendimientos de los promedios de todas las accesiones, bajo los tratamientos de SS y SE, respectivamente.

También se calculó el índice de tolerancia a la sequía (ITS) mediante la ecuación 2:

$$ITS = RG_{ass} \times RG_{ase} [2]$$

La cosecha se realizó de manera escalonada cuando las accesiones alcanzaron la madurez fisiológica, identificada cuando el hilum del grano adquiere una capa de color oscuro (Muñoz et al. 1993). Los análisis estadísticos de las variables medidas en la investigación incluyeron análisis de varianza, separación de medias mediante la prueba DMS (0.05), y análisis de componentes principales para el rendimiento de cada experimento, utilizando el programa estadístico INFOSTAT versión 2017.

## Resultados

La temperatura media diaria durante el periodo de febrero a mayo del 2020 en el Experimento 1 varió de 20.2 °C a 27.4 °C y la precipitación fue casi cero durante la etapa vegetativa, a excepción de los días 1 y 3 cuando la precipitación fue de 0.01 mm día<sup>-1</sup>, y el día 60 de 0.2 mm día<sup>-1</sup>, y la precipitación alcanzó un máximo de 0.40 mm día<sup>-1</sup> en la etapa vegetativa (Figura 1). Durante el periodo de diciembre 2020 a abril 2021 del Experimento 2, la temperatura media diaria osciló entre 19 °C y 25 °C. La precipitación fue muy variable, de 0.079 mm día<sup>-1</sup> al inicio de ciclo del cultivo con lluvias intermitentes de 0.004 a 0.013 mm día<sup>-1</sup> y al final del ciclo de 0.038 a 0.042 mm día<sup>-1</sup> (Figura 2). En ambos experimentos las cantidades mínimas de lluvia registradas no afectaron la respuesta de las accesiones de sorgo a los tratamientos de estrés hídrico.

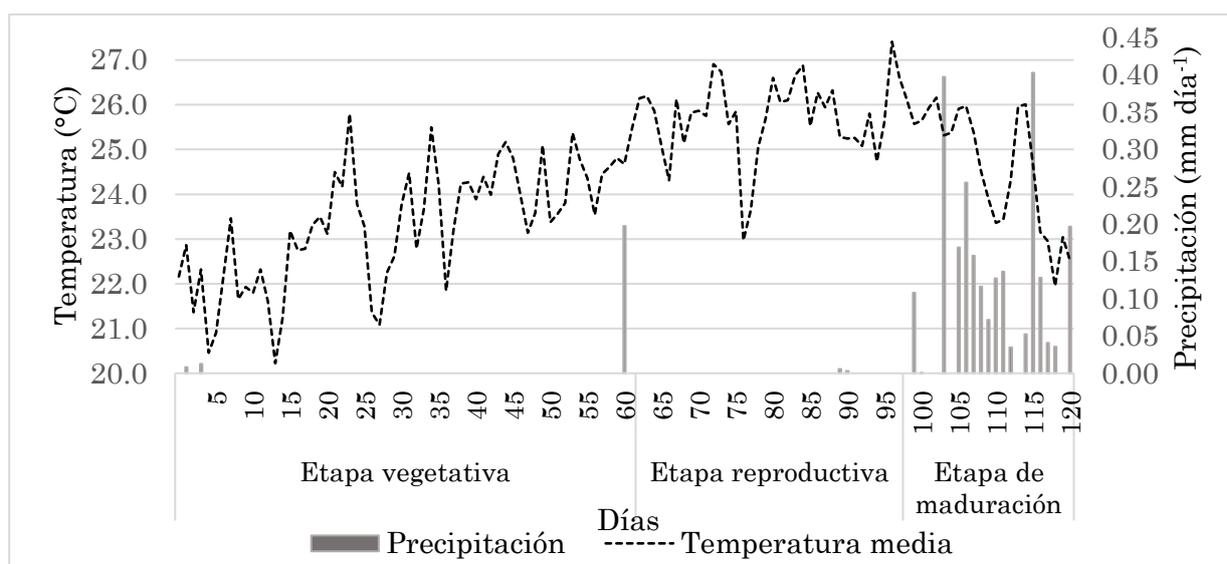


Figura 1. Variaciones de la precipitación y temperatura media durante el ciclo del cultivo del Experimento 1. Zamorano, Honduras, febrero-mayo 2020.

### ***Variaciones de la humedad del suelo en los tratamientos de estrés hídrico***

Las cantidades totales de agua proveídas mediante el sistema de riego por goteo en los tratamientos de estrés de sequía severo (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE, riego hasta madurez fisiológica) en el Experimento 1, fueron 245, 304 y 401 mm, respectivamente. En el Experimento 2 las cantidades de agua de riego en los tratamientos de estrés SS, SM y SE fueron de 128, 171 y 316 mm, respectivamente; siendo las cantidades totales de agua en los tratamientos de estrés hídrico significativamente menores en el Experimento 2.

En el Experimento 1, el riego en el tratamiento SS se suspendió a los 58 DDS. En esa fecha la primera medición de la humedad en el suelo a los 20 cm de profundidad en el lote experimental fue de 17 %, y a 40 cm de 24.1%, en los tres tratamientos de estrés de sequía (Figura 3). Las mediciones a los 68, 75, 82 y 89 DDS mostraron una tendencia de disminución de la humedad del suelo por debajo del punto de

marchitez permanente (PMP). A los 89 DDS la humedad a los 20 cm de profundidad se redujo a 2.9% en SS, 3.3% en SM, y 12.7% en SE; y a los 40 cm la humedad de suelo se redujo a 2.6% en SS, 2.7% en SM, y 12.7% en SE. En las parcelas SE, la humedad estuvo ligeramente por debajo del PMP a los 68 y 75 DDS, pero fue superior al PMP a los 82 DDS y similar a los 89 DDS.

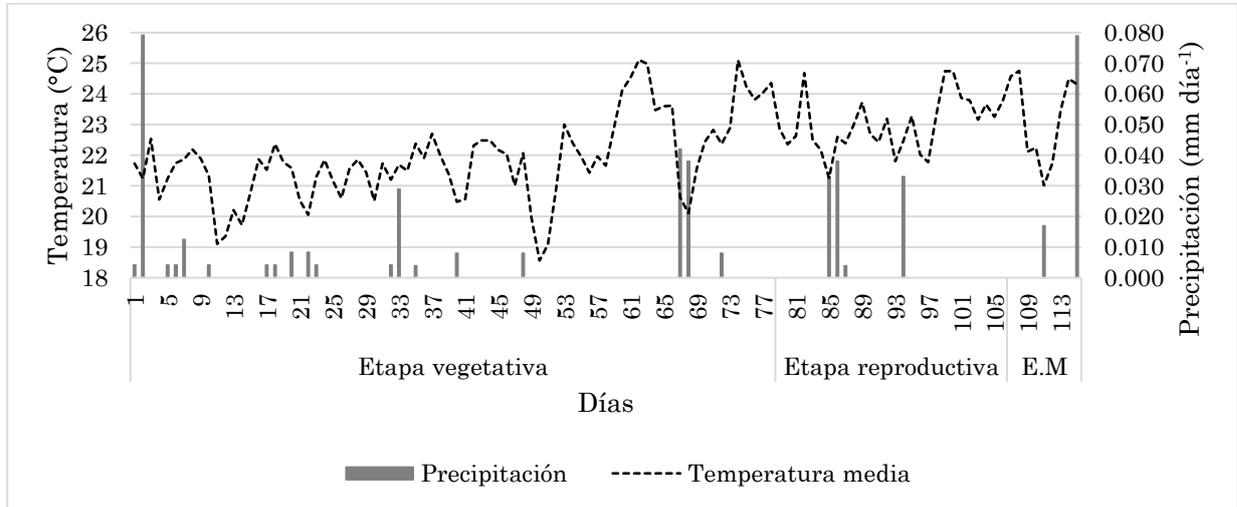


Figura 2. Variaciones de la precipitación y temperatura media durante el ciclo del cultivo del Experimento 2. Zamorano, Honduras, diciembre 2020-abril 2021.

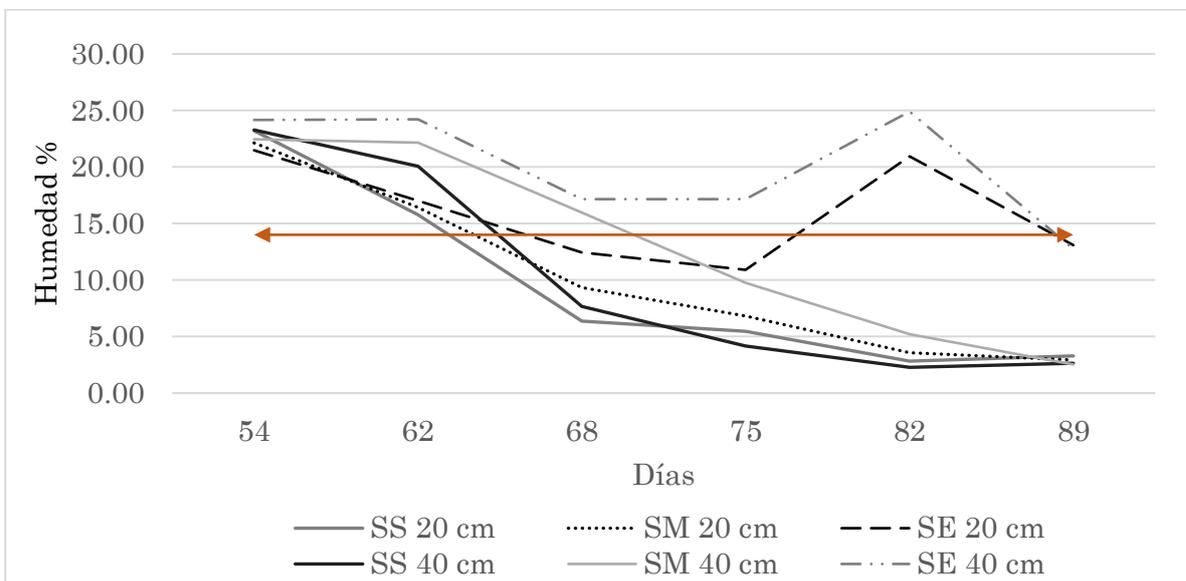


Figura 3. Humedad del suelo a 20 y 40 cm de profundidad en el Experimento 1 de la evaluación de la tolerancia de 19 accesiones de sorgo bajo condiciones de estrés de sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE). Zamorano, Honduras, febrero-mayo 2020.

En el Experimento 2, los porcentajes de humedad de los perfiles del suelo a 20 cm, 40 cm y 60 cm de profundidad para los días posteriores a la suspensión del riego en el tratamiento SS (56 DDS), varió de 24 a 28% en SS, de 22 a 31% en SM, y de 23 a 30% en SE. A los 106 DDS, la humedad a los 20 cm en SS disminuyó a 3.6%, en SM a 4.9%, y en SE entre 20 y 30% desde el día 56 al día 106 (Figura 4). La humedad a los 40 cm en SS y SM disminuyó hasta llegar a 5.0% y 6.35%, respectivamente; pero en SE,

se mantuvo entre 27.2% y 34%. La humedad a los 60 cm presentó la misma tendencia para SS y SM disminuyendo hasta alcanzar los 5% y 6.2%, respectivamente; y en el tratamiento SE la humedad osciló entre 20% y 31%. A partir de los 74 DDS, y de acuerdo con el tratamiento de estrés y la profundidad del suelo, se empezó a apreciar los niveles de humedad del suelo por debajo del PMP, siendo la disminución de humedad más rápida en SS que en SM, y a 20 y 40 cm que a 60 cm de profundidad. En el tratamiento SE no se registró una disminución significativa en la humedad del suelo a diferentes profundidades manteniéndose por encima del PMP debido a la aplicación frecuente de riego.

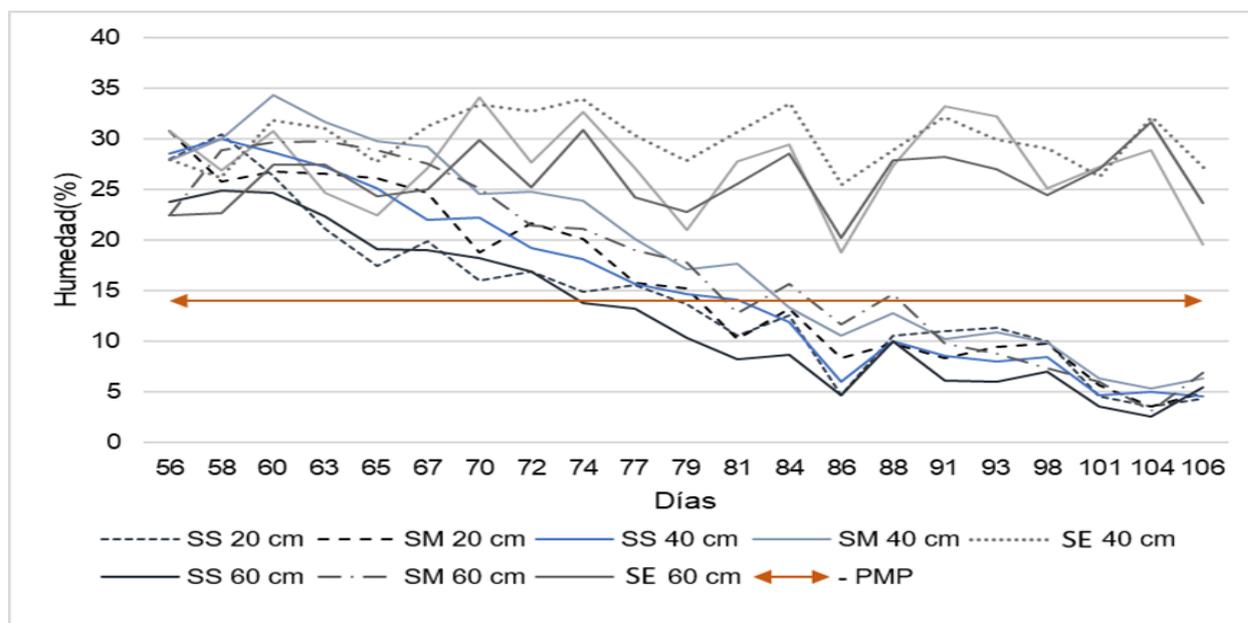


Figura 4. Humedad del suelo a 20, 40 y 60 cm de profundidad de evaluación de la tolerancia de accesiones de sorgo en el Experimento 2 a las condiciones de estrés de sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE). Zamorano, Honduras, diciembre 2020-abril 2021.

### **Efectos del estrés hídrico en las variables fenotípicas y rendimiento de accesiones de sorgo**

El Experimento 1 conducido durante el verano de enero-mayo 2020 presentó diferencias significativas debidas al efecto de los tratamientos de estrés de sequía en la altura de planta ( $p=0.0004$ ), senescencia foliar ( $p=0.0013$ ), tasa de macollamiento ( $p=0.0001$ ), clorofila relativa ( $p=0.0058$ ), y acame ( $p=0.0011$ ) (Cuadro 1). En este periodo no se presentaron diferencias en las variables de rendimiento de grano, peso de 100 semillas, longitud de panoja, días a floración, y días a madurez fisiológica. La altura de planta, la tasa de macollamiento, y la clorofila relativa disminuyeron, y en cambio la senescencia de hojas y el acame se incrementaron, con la intensidad del estrés de sequía. En el Experimento 2 un número mayor de variables incluyendo al rendimiento de grano, peso de 100 semillas, senescencia foliar, tasa de macollamiento, clorofila relativa, y días a floración y a madurez fisiológica, presentaron diferencias estadísticas significativas debido al efecto de los tratamientos de estrés de sequía impuestos a las accesiones de sorgo (Cuadro 2). El rendimiento de grano, peso de 100 semillas, tasa de macollamiento, acame, días a floración y madurez fisiológica disminuyeron, y la senescencia y el acame aumentaron según la intensidad de los tratamientos de estrés por sequía.

En el Experimento 1 conducido de enero-mayo 2020 se presentaron diferencias significativas en el rendimiento de las accesiones de sorgo debido a los efectos de los tratamientos de sequía SS ( $p=0.0216$ ) y SE ( $p<0.0001$ ), pero no hubo diferencias bajo SM (Cuadro 3). En el tratamiento SS, los rendimientos más altos se presentaron en las accesiones PCR 3-22 ( $3,640 \text{ kg ha}^{-1}$ ), Blanco Tortillero ( $3,230 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y DICTA 29 ( $3,014 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y otros; y en el tratamiento SE las accesiones CENTA RCV- BMR ( $3,163 \text{ kg ha}^{-1}$ ), CENTA S-3 N ( $3,037 \text{ kg ha}^{-1}$ ), CENTA RCY-N ( $2,963$ ) y otras. Como se observa en el cuadrante

superior derecho del contraste del rendimiento bajo estrés SS en relación con SE, se destacan las accesiones PCR 3-22, Blanco Tortillero y DICTA 29. En este mismo cuadrante se incluye a Sureño y Sureño II con uno de los mejores rendimientos SE y con ligera superioridad al promedio de las demás accesiones bajo SS (Figura 5).

Cuadro 1. Efectos de los tratamientos de estrés de sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE) en las variables medidas en 19 accesiones de sorgo del Experimento 1. Zamorano, Honduras, Febrero-mayo 2020.

Variable	SS	SM	SE	DMS	CV (%)	Valor p
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	2395 <sup>a†</sup>	2413 <sup>a</sup>	2585 <sup>a</sup>	600	27.9	0.7510
Peso 100 semillas (g)	2.21 <sup>a</sup>	2.65 <sup>a</sup>	2.40 <sup>a</sup>	0.48	16.6	0.1753
Longitud de panoja (cm)	25.3 <sup>a</sup>	25.8 <sup>a</sup>	24.9 <sup>a</sup>	1.77	8.6	0.4522
Altura de planta (cm)	158 <sup>c</sup>	171 <sup>b</sup>	182 <sup>a</sup>	6.78	8.2	0.0004
Senescencia (%)	60.3 <sup>a</sup>	41.8 <sup>b</sup>	27.2 <sup>c</sup>	11.6	24.3	0.0013
Tasa de macollamiento	1.71 <sup>c</sup>	2.05 <sup>b</sup>	2.25 <sup>a</sup>	0.09	16.8	<0.0001
Acame	2 <sup>a</sup>	1 <sup>b</sup>	1 <sup>b</sup>	0.32	44.5	0.0011
Clorofila relativa (SPAD)	57.3 <sup>b</sup>	59.3 <sup>b</sup>	63 <sup>a</sup>	2.71	9.1	0.0058
Floración (días)	62 <sup>a</sup>	62 <sup>a</sup>	62 <sup>a</sup>	1.92	7.0	0.9484
Madurez fisiológica (días)	99 <sup>a</sup>	98 <sup>a</sup>	99 <sup>a</sup>	3.91	4.93	0.5244

†Medias con una letra común en las filas horizontales no son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). DMS (diferencia mínima significativa al  $p < 0.05$ ). CV (coeficiente de variación).

Cuadro 2. Efectos de los tratamientos de estrés de sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE) en las variables del Experimento 2. Zamorano, Honduras, diciembre 2020-mayo 2021.

Variable	SS	SM	SE	DMS	CV (%)	Valor p
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	2,347 <sup>b†</sup>	2809 <sup>a</sup>	3045 <sup>a</sup>	373	21.4	0.0102
Peso 100 semillas (g)	2.69 <sup>b</sup>	2.85 <sup>b</sup>	3.18 <sup>a</sup>	0.32	12.08	0.0249
Longitud de panoja (cm)	24.5 <sup>a</sup>	25.3 <sup>a</sup>	24.7 <sup>a</sup>	0.99	10.77	0.2057
Altura de planta (cm)	144 <sup>ab</sup>	140 <sup>b</sup>	146 <sup>a</sup>	5.86	4.34	0.0991
Senescencia (%)	55.82 <sup>a</sup>	37.08 <sup>b</sup>	15.53 <sup>c</sup>	4.39	13.6	<0.0001
Tasa de macollamiento	1.24 <sup>c</sup>	1.67 <sup>a</sup>	1.50 <sup>b</sup>	0.06	15.26	<0.0001
Acame	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	0.24	52.6	0.4735
Clorofila relativa (SPAD)	53.8 <sup>b</sup>	50 <sup>b</sup>	66.3 <sup>a</sup>	4.01	15.17	0.0002
Floración (días)	76 <sup>c</sup>	81 <sup>a</sup>	78 <sup>b</sup>	1.54	3.52	0.0008
Madurez fisiológica (días)	103 <sup>b</sup>	107 <sup>a</sup>	107 <sup>a</sup>	2.45	6.58	0.0141

†Medias con letras diferentes en líneas horizontales son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). DMS (diferencia mínima significativa al  $p < 0.05$ ). CV (coeficiente de variación).

En el Experimento 2 conducido en diciembre 2020-abril 2021 también existieron diferencias estadísticas para el rendimiento de grano de las accesiones de sorgo bajo las tres condiciones de estrés de sequía (Cuadro 3). En el tratamiento SS, las mejores accesiones fueron PCR 1-16 (3,812 kg ha<sup>-1</sup>), CENTA S-3 (3,235 kg ha<sup>-1</sup>), CENTA RCY-N (3,197 kg ha<sup>-1</sup>). Bajo SM fueron CENTA RCY-N (4,410 kg ha<sup>-1</sup>), PCR 3-22 (4,227 kg ha<sup>-1</sup>), DICTA 29 (4,210 kg ha<sup>-1</sup>); y en SE las accesiones PCR 1-16 (3,865 kg ha<sup>-1</sup>), Sureño II (3,543 kg ha<sup>-1</sup>), PCR 3-22 (3,518 kg ha<sup>-1</sup>), Sureño (3,506 kg ha<sup>-1</sup>). En el cuadrante superior derecho del contraste del rendimiento bajo estrés SS en relación con SE, se destacan las accesiones PCR 1-16, CENTA RCY-N, DICTA 29, PCR 3-22, Sureño y Sureño II (Figura 6). Algunas accesiones se destacaron en rendimiento de granos bajo las condiciones de estrés SS como en SM y SE, presentando una mejor estabilidad.

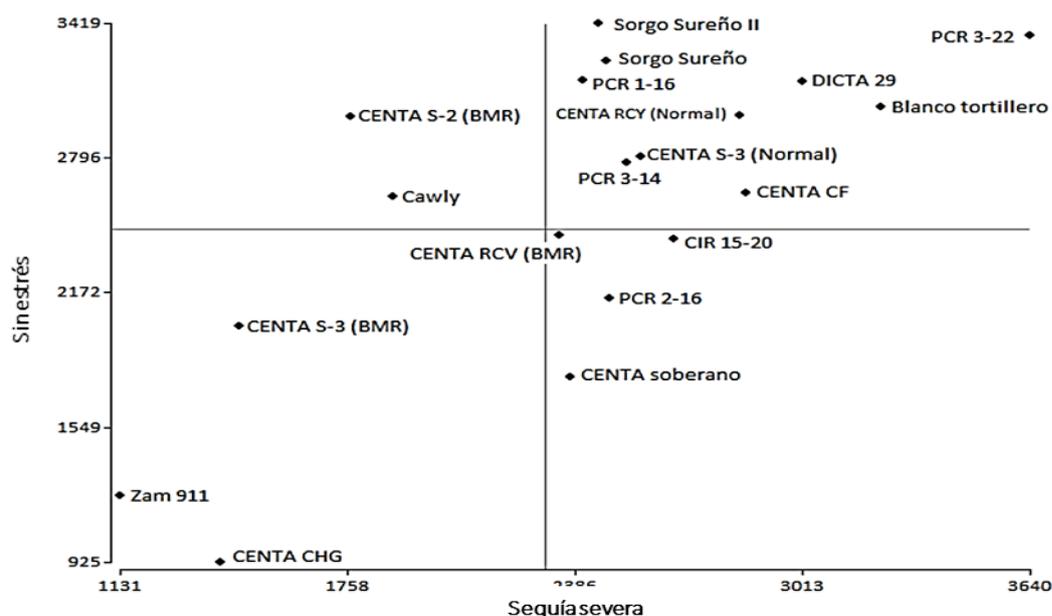


Figura 5. Contraste en el rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) de las accesiones de sorgo bajo los tratamientos de sequía severa (SS) y sin estrés (SE) del Experimento 1. Zamorano, Honduras, febrero-mayo 2020.

Cuadro 3. Rendimiento de grano de 19 accesiones de sorgo de los Experimentos 1 y 2 conducidos bajo tratamientos de sequía severa (SS), sequía moderada (SM) y sin estrés (SE), e índices de susceptibilidad al estrés (ISE) y de tolerancia a la sequía (TSQ). Zamorano, Honduras, 2020-21.

Accesión	Rendimiento- E1 (kg ha <sup>-1</sup> )			Rendimiento- E2 (kg ha <sup>-1</sup> )			Índices de estrés	
	SS	SM	SE	SS	SM	SE	ISE	TSQ
Blanco Tortillero	3,230	1,688	3,035	2,694	1,677	2,125	-2.64	-1017
Cawly	1,883	1,710	2,615	1,702	1,880	1,789	0.41	178
CENTA CF (Rojo)	2,855	2,654	2,635	2,706	3,119	2,905	0.58	414
CENTA CHG	1,406	2,763	925	948	1,871	1,332	2.15	923
CENTA RCV (BMR)	2,344	3,163	2,439	1,805	2,798	2,247	1.55	994
CENTA RCY (N)	2,840	2,968	2,991	3,197	4,410	3,755	1.20	1213
CENTA S-2 (BMR)	1,767	2,139	2,985	2,438	1,964	2,188	-1.05	-474
CENTA S-3 (BMR)	1,460	2,323	2,018	919	2,177	1,414	2.52	1258
CENTA S-3 (N)	2,567	3,037	2,801	2,480	4,032	3,162	1.68	1552
CENTA Soberano	2,373	2,844	1,780	1,564	3,267	2,260	2.27	1702
CIR 15-20	2,656	2,347	2,419	3,235	2,781	2,999	-0.71	-455
DICTA 29	3,014	1,737	3,150	3,013	4,210	3,561	1.24	1197
PCR 1-16	2,409	2,170	3,153	3,812	3,919	3,865	0.12	107
PCR 2-16	2,482	2,160	2,144	1,226	2,266	1,667	2.00	1040
PCR 3-14	2,529	2,914	2,774	2,677	2,945	2,808	0.40	269
PCR 3-22	3,640	2,525	3,364	2,928	4,227	3,518	1.34	1299
Sureño	2,473	2,500	3,243	3,112	3,950	3,506	0.92	838
Sureño II	2,451	2,056	3,419	3,100	4,050	3,543	1.02	951
Zam 911	1,131	2,144	1,234	1,037	2,323	1,552	2.41	1286
<b>Promedio</b>	<b>2,395</b>	<b>2,413</b>	<b>2,585</b>	<b>2,347</b>	<b>3,045</b>	<b>2,673</b>	<b>1.00</b>	<b>699</b>
<b>DMS (0.05)</b>	<b>1,212</b>	<b>995</b>	<b>706</b>	<b>790</b>	<b>820</b>	<b>876</b>		
<b>Valor p</b>	<b>0.0216</b>	<b>0.0671</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>&lt;0.0001</b>		
<b>Coef. Variación (%)</b>	<b>34.5</b>	<b>29.1</b>	<b>19.3</b>	<b>237</b>	<b>20.6</b>	<b>20.1</b>		

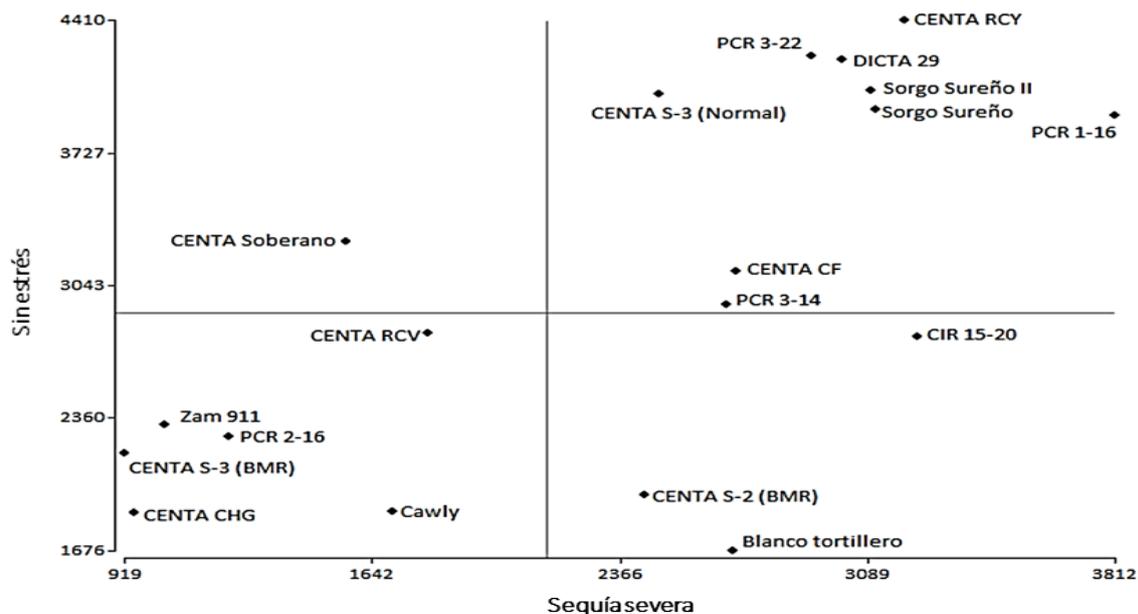


Figura 6. Contraste en el rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) de las accesiones de sorgo bajo los tratamientos de sequía severa (SS) y sin estrés (SE) del Experimento 2. Zamorano, Honduras, diciembre 2020 -abril 2021.

## Discusión

Las diferencias en las variaciones de las temperaturas durante los ciclos de cultivo de los experimentos conducidos en las épocas de verano del 2020 y 2021, afectaron el comportamiento de las accesiones de sorgo. Durante la temporada de verano 2021 las temperaturas y la acumulación térmica fueron menores que en el verano del 2020 y el ciclo fenológico promedio de las accesiones fue más largo en el Experimento 2. Bajo un ciclo de cultivo más largo y condiciones de estrés hídrico más intensas, los efectos de los tratamientos de estrés de sequía en el rendimiento promedio de las accesiones fueron más marcados en el Experimento 2, condiciones similares a las reportadas por Colazo y Garay (2012) y Upadhyaya et al. (2017).

Las cantidades de agua provistas mediante riego por goteo en el Experimento 1 fueron mayores que en el Experimento 2 en los tres tratamientos de estrés de SS, SM y SE, siendo el factor principal de que no se presentaran diferencias en los días a floración y a madurez fisiológica, y en el rendimiento promedio de las accesiones de sorgo en el Experimento 1, pero si en el Experimento 2. Los mecanismos para mantener el crecimiento y desarrollo en ambientes áridos son complejos y las plantas sobreviven mediante diversas estrategias como el escape, la evitación o tolerancia (Ludlow y Muchow 1990). La temperatura ambiental es un factor que influye en la duración del ciclo fenológico que impacta en el rendimiento, ya que las accesiones de ciclo corto presentan un mecanismo de escape a la sequía (Upadhyaya et al. 2017).

Para manejar de manera eficiente la humedad del suelo, en condiciones de desecación de los tejidos, los mecanismos de tolerancia de las plantas protegen la integridad celular y metabólica. Al identificar plantas tolerantes, se puede enfocarse en los rasgos fisiológicos o morfológicos asociados con la expresión de tolerancia a la sequía. La expresión de la tolerancia a la sequía depende de la etapa de desarrollo cuando ocurre el estrés. En el cultivo de sorgo, Rosenow y Clark (1981) han identificado patrones específicos de desarrollo de tolerancia a la sequía y se han caracterizado las peculiaridades de susceptibilidad durante cada etapa. La susceptibilidad durante la etapa posterior a la floración se caracteriza por la reducción del tamaño de la semilla y el rendimiento de grano, la senescencia prematura de las plantas y las hojas y un aumento del alojamiento del tallo.

Un rasgo asociado con la tolerancia a la sequía después de la floración es la permanencia verde de las hojas (*stay green* en inglés) que se caracteriza por su resistencia a senescencia de las hojas y tallos inducida por la sequía post-floración. La clorofila relativa y la senescencia foliar son variables

importantes para determinar la tolerancia a la sequía y están directamente relacionadas con la biomasa de la planta (Tuberosa 2012). Así mismo, Kapanigowda et al. (2013) señalan que el contenido de clorofila disminuye cuando las accesiones son sometidas a estrés de sequía. En los experimentos las accesiones bajo estrés de SS y SM presentaron menor contenido de clorofila que bajo SE. Durante el 2020 las accesiones presentaron un contenido de clorofila superior a 57.8 sugerido por Mutava et al. (2011) para líneas élites de sorgo, y en este aspecto las más sobresalientes fueron CENTA S-2 (BMR) y PCR 1-16. En el verano del 2021 todas las accesiones superaron la cantidad de clorofila propuesta por Mutava et al. (2011) en el tratamiento SE.

En las parcelas con el tratamiento SE en el período 2021, la senescencia promedio fue menor al 20%, por lo que se considera las accesiones bajo este tratamiento como no senescentes. En cambio, en el tratamiento SS en ambos períodos se pudo encontrar accesiones con alta senescencia (>70%) (Cuadros 1 y 2). Assefa et al. (2010) expresan que la senescencia es un proceso natural en los cultivos y se presenta en las últimas etapas fenológicas. Por su parte, Wagaw (2019) señala que se debe a la disminución de la clorofila, y menciona que las accesiones son consideradas verdes cuando tienen <20% de senescencia y son senescentes con >70 % de senescencia. El contenido de clorofila y la senescencia son importantes en la producción y calidad de forraje, sobre todo porque el sorgo es un cultivo de doble propósito (Wagaw 2019; Pino y Heinrichs 2017; Deshpande et al. 2016).

De acuerdo con Assefa et al. (2010), las diferentes etapas presentan diferentes grados de susceptibilidad a los efectos de la sequía, siendo las etapas entre panoja embuchada (V5) y grano pastoso (R8), la más crítica debido a que el requerimiento hídrico es mayor. Según señalan Manavalan y Nguyen (2017) las plantas adaptan la duración de su ciclo fenológico como mecanismo para escapar a los efectos de la sequía y esto se ve influenciado en el rendimiento de grano, ya que el objetivo de la planta es garantizar la supervivencia de su especie a través del tiempo. Para Wagaw (2019) es importante que la floración se presente antes del comienzo de la sequía así el llenado de grano dependerá de la humedad existente en el suelo y la reducción en el rendimiento será menor.

Basado en los resultados obtenidos, las variedades que alcanzaron la floración entre 57 y 66 DDS en ambas épocas se consideran precoces según Kapanigowda et al. (2013), y estas incluyen a las accesiones PCR 3-22, Blanco Tortillero, DICTA 29, CENTA CF (rojo), PCR 1-16, PCR 3-14, PCR 2-16, CIR 15-20, CENTA RCY (N), Sureño, que presentaron alto rendimiento y se identificaron como tolerantes a sequia de acuerdo con los índices empleados. Sin embargo, CENTA CF (Rojo) fue muy tardía y aun así presentó un grado aceptable de tolerancia y rendimiento alto; lo que según Tuberosa (2012) requiere la identificación del período crítico de requerimiento de agua para determinar como un cultivo evade la sequía.

Los rendimientos de las accesiones presentaron diferencias significativas en todos los niveles de estrés hídrico en los dos experimentos, a excepción del tratamiento SM en el verano del 2020. Para identificar las accesiones promisorias con tolerancia a la sequía se hicieron comparaciones de los rendimientos de los tratamientos de SS y SE, a través de la media geométrica para la partición del plano cartesiano en cuadrantes (Fernández 1993; Menezes et al. 2014). De acuerdo con este esquema, las accesiones de sorgo más promisorias se encuentran ubicadas en la parte superior derecha en el gráfico de las comparaciones de rendimiento de las accesiones que incluye PCR 3-22, DICTA 29 y Blanco Tortillero, como las más sobresalientes en el Experimento 1 (Figura 5), y CENTA RCY (normal), DICTA 29, Sureño, Sureño II, y PCR 1-16 en el Experimento 2 (Figura 6).

Jafari et al. (2009) y Menezes et al. (2014) mencionan la importancia de conocer el nivel de tolerancia de las accesiones producidas bajo estrés de sequía y su comportamiento en condiciones normales sin estrés. Con base en los resultados de rendimiento y mediante los índices de tolerancia a sequía, se determinó que en el verano del 2020 las accesiones Blanco Tortillero, CENTA CF (Rojo), CENTA CHG (Para grano), CENTA Soberano, CIR 15-20, PCR 2-16 y PCR 3-22 demostraron la mayor tolerancia a sequía. En cambio, en el verano del 2021 solo CENTA S-2 (BMR), Blanco Tortillero y CIR 15-20 resultaron tolerantes según los índices de sequía. El aplicar los índices de sequía permite identificar la intensidad de sequía a la que las accesiones estuvieron sometidas en diferentes épocas (Upadhyaya et al. 2017).

La duración y el momento de aparición de las etapas fisiológicas del cultivo también influyen en el peso de grano un componente importante del rendimiento, y según Tuinstra et al. (1997) la etapa reproductiva es la que mayor influencia tiene, porque define el tiempo de formación y llenado de grano. En el período 2020, en el cual el ciclo del cultivo del Experimento 1 fue más corto, no existieron diferencias significativas entre tratamientos de estrés de sequía para el peso del grano, en cambio en el 2021 si se encontraron diferencias. Xiong et al. (2019) describen la importancia del grano para la seguridad alimentaria, por eso es importante conocer el tamaño del grano. A partir del peso, Muñoz et al. (1993) expresaron que los granos son considerados medianos (1.6 a 3.5 g/100 granos) y grandes (3.6 g y 5.0 g/100 granos). Según este criterio todas las accesiones en el verano del 2020 presentaron semillas medianas, pero en el verano del 2021 las semillas se distribuyen entre medianas y grandes. Las accesiones con semillas grandes fueron Blanco Tortillero, CENTA S-2 (BMR), PCR 1-16, CIR 15-20 y PCR 3-14.

Las variables más relacionadas con la producción de forraje son la altura de planta y la tasa de macollamiento. La tasa de macollamiento se relaciona a la cantidad de biomasa total y las accesiones que tengan una tasa mayor presentan mayor potencial para producir forraje. Llera et al. (2011) mencionan también que las tasas altas de macollamiento no son favorables, ya que disminuyen el rendimiento de grano en caso de que este sea el objetivo final. Por otra parte, Assefa et al. (2010) indica que la altura de planta se ve influenciada por la cantidad de agua y muchas accesiones tienen una disminución en el crecimiento debido a ella. Kapanigowda et al. (2013) identificaron que las variedades de sorgo bajo estrés de sequía presentan menor altura de planta y las variedades producidas en condiciones normales presentan una altura mayor. En el período 2020 la altura de planta fue mayor en el tratamiento SE que en la de estrés de SS, demostrando que la sequía afecta el crecimiento de las plantas de sorgo.

## Conclusiones

Las accesiones de sorgo que presentaron el mejor comportamiento bajo sequía severa tienen mayor potencial de adaptarse a diferentes ambientes con presencia de estrés hídrico como en condiciones hídricas favorables. La caracterización fenotípica de las accesiones de sorgo permitió identificar accesiones tolerantes al estrés de sequía con base al rendimiento per se, pero también otras variables fenotípicas relacionadas a la tolerancia a sequía, lo que permite aclarar el panorama para poder identificar cuales accesiones son las más promisorias ante los efectos de la sequía. Además, el empleo de índices de sequía permitió comprender mejor las diferencias en las accesiones con mayor potencial de adaptación en áreas con condiciones de estrés hídrico.

Por otro lado, el identificar accesiones con un buen grado de tolerancia a la sequía, indica la diversidad existente en el grupo relativamente pequeño de accesiones y el potencial futuro que representa el ampliar esta colección con otras fuentes de germoplasma para aumentar la colección de sorgo del Banco de Germoplasma de Zamorano. Las accesiones de sorgo más promisorias identificadas en esta investigación serán evaluadas próximamente en fincas de agricultores del Corredor Seco de Honduras mediante metodologías participativas, para validar el potencial de adaptación con fines de liberación como variedad comercial y/o su uso en mejoramiento genético para la generación de variedades adaptadas al estrés hídrico con resistencia a las principales enfermedades y plagas, y buena calidad de grano y forraje de este cultivo.

## Agradecimientos

A la fundación NIPPON por el apoyo financiero y confianza brindada durante los estudios de Maestría de A. Espinoza y en la conducción de la presente investigación.

## Literatura citada

- Assefa Y, Staggenborg SA, Prasad VPV. 2010. Grain Sorghum Water Requirement and Responses to Drought Stress: A Review. *Crop Management* 9(1):1–11. doi:10.1094/CM-2010-1109-01-RV.
- Calvo-Solano O, Quesada-Hernández L, Hidalgo H, Gotlieb Y. 2018. Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana* 29(3):695. doi:10.15517/ma.v29i3.30828.
- Christin P, Osborne C. 2014. The evolutionary ecology of C4 plants. *New Phytologist* 204(4):765–781. eng. doi:10.1111/nph.13033.

- Colazo J, Garay J. 2012. Fenología y fisiología del cultivo de sorgo. En: Colazo J, Garay J, Veneciano J, editores. El cultivo de sorgo en San Luis. La Pampa: INTA. p. 15–18.
- Deshpande S, Rakshit S, Manasa KG, Pandey S, Gupta R. 2016. Genomic Approaches for Abiotic Stress Tolerance in Sorghum. En: Rakshit S, Wang Y-H, editores. The Sorghum Genome. Cham: Springer International Publishing. p. 169–187 (Compendium of Plant Genomes).
- Echeverría J. 2016. Análisis socioeconómico del impacto sectorial de la sequía de 2014 en Centroamérica. Tegucigalpa: GWP Centroamérica.
- FAOSTAT. 2021. Sorghum Database. [sin lugar]: [sin editorial]. <http://www.fao.org/faostat/es/>.
- Ghannoum O. 2009. C4 photosynthesis and water stress. *Ann Bot.* 103(4):635–644. eng. doi:10.1093/aob/mcn093.
- Hariprasanna K, Rakshit S. 2016. Economic Importance of Sorghum. En: Rakshit S, Wang Y-H, editores. The Sorghum Genome. Cham: Springer International Publishing. p. 1–25 (Compendium of Plant Genomes).
- Hidalgo HG, Alfaro EJ, Amador JA, Bastidas Á. 2019. Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor. *Climate Dynamics* 53(3-4):1307–1322. doi:10.1007/s00382-019-04638-y.
- Kapanigowda MH, Perumal R, Djanaguiraman M, Aiken RM, Tesso T, Prasad PV, Little CR. 2013. Genotypic variation in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] exotic germplasm collections for drought and disease tolerance. *SpringerPlus.* 2:650. eng. doi:10.1186/2193-1801-2-650.
- Ludlow MM, Muchow RC. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy* 43: 107–153.
- Menezes CB, Ticona-Benavente CA, Tardin FD, Cardoso MJ, Bastos EA, Nogueira DW, Portugal AF, Santos CV, Schaffert RE. 2014. Selection indices to identify drought-tolerant grain sorghum cultivars. *Genet Mol Res.* 13(4):9817–9827. eng. doi:10.4238/2014.November.27.9.
- Morán A, Villeda M. 2012a. Sorgo DICTA-10 BMR: Sorgo de doble propósito para ensilaje. Honduras: DICTA. <https://digitalcommons.unl.edu/intormilpubs/11>.
- Morán A, Villeda M. 2012b. Sorgo Sureño Normal: El Sorgo tradicional de Honduras de doble propósito. Honduras: DICTA. <https://digitalcommons.unl.edu/intormilpubs/11>.
- Muñoz G, Giraldo G, Fernández J. 1993. Descriptores varietales: arroz, frijol, maíz, sorgo. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (vol. 177). ISBN: 958-9183-27-1. es. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54651>.
- Mutava RN, Prasad P, Tuinstra MR, Kofoed KD, Yu J. 2011. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. *Field Crops Research* 123(1):10–18. doi:10.1016/j.fcr.2011.04.006.
- Nelson G, Rosegrant M, Koo J, Robertson R, Sulser T, Zhu T, Ringler C, Msangi A, Palazzo A, Batka M, et al. 2009. Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Washington: International Food Policy Research Institute (IFPRI). ISBN: 978-0-89629-537-7.
- Rosenow DT, Clark LE. 1981. Drought tolerance in sorghum. In: Proceedings of the 36th Annual Corn and Sorghum Research Conference, pp. 18–30. American Seed Trade Association, Washington, DC.
- Tuberosa R. 2012. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Frontier Physiology* 3:1–26. eng. doi:10.3389/fphys.2012.00347.
- Tuinstra MR, Grote EM, Goldsbrough PB, Ejeta G. 1997. Genetic analysis of post-flowering drought tolerance and components of grain development in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Molecular Breeding* 3(6):439–448. doi:10.1023/A:1009673126345.
- Upadhyaya HD, Dwivedi SL, Vetriventhan M, Krishnamurthy L, Singh SK. 2017. Post-Flowering Drought Tolerance Using Managed Stress Trials, Adjustment to Flowering, and Mini Core Collection in Sorghum. *Crop Science* 57(1):310–321. doi:10.2135/cropsci2016.04.0280.
- Upadhyaya HD, Dwivedi SL, Wang Y-H, Vetriventhan M. 2016. Sorghum Genetic Resources. En: Ciampitti A, Vara PV (eds.). Sorghum: State of the Art and Future Perspectives. [sin lugar]: American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, Inc. p. 47–72 (Agronomy Monographs).
- [USDA] United States Department of Agriculture. 2021. World Agricultural Production. [sin lugar]. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>.
- Wagaw K. 2019. Review on Mechanisms of Drought Tolerance in Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Basis and Breeding Methods. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research* 7(2):87–99. [https://www.researchgate.net/publication/332188076\\_Review\\_on\\_Mechanisms\\_of\\_Drought\\_Tolerance\\_in\\_Sorghum\\_Sorghum\\_bicolor\\_L\\_Moench\\_Basis\\_and\\_Breeding\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/332188076_Review_on_Mechanisms_of_Drought_Tolerance_in_Sorghum_Sorghum_bicolor_L_Moench_Basis_and_Breeding_Methods). doi:10.14662/ARJASR2019.007.

Espinoza Ayala A, Colbert RW, Rodriguez IY, Rosas-Sotomayor JC. 2021. Caracterización fenotípica de accesiones de sorgo para la adaptación a condiciones de sequía del Corredor Seco Centroamericano. Ceiba. Zamorano Investiga: 22–35.

Wang HL, Zhang HW, Du RH, Chen GL, Liu B, Yang YB, Qin L, Cheng EY, Liu Q, Guan YA. 2016. Identification and validation of QTLs controlling multiple traits in sorghum. *Crop Pasture Science* 67(2):193. en. <https://www.publish.csiro.au/cp/CP15239>. doi:10.1071/CP15239.

Zeledón H, Hernández M, Ayala J, Guzmán R, Borja C, Alvarado M, Calderón V. 2007. Guía Técnica del Sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). 1ª ed. La Libertad, El Salvador: CENTA. <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/granos%20basicos/GUIA%20TECNICA%20SORGO>. pdf.

Recibido octubre 22, 2021; aceptado noviembre 11, 2021.

Cómo citar: Espinoza- Ayala A, Colbert RW, Rodriguez IY, Rosas-Sotomayor JC. 2021. Caracterización fenotípica de accesiones de sorgo para la adaptación a condiciones de sequía del Corredor Seco Centroamericano. Ceiba. Zamorano Investiga: 22–35.