

Comportamiento agronómico de accesiones de maíz de Honduras bajo estrés de sequía¹

Marvin Joel Gómez Cerna²

marvincerna79@gmail.com

Investigador

Fundación para la Investigación Participativa con Agricultores de Honduras

Raphael Wesly Colbert

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. El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de mayor importancia para la seguridad alimentaria y nutricional de la mayoría de la población rural en Centroamérica. Los bajos rendimientos y los desafíos que representa el cambio climático para la región hacen imperativa la necesidad de desarrollar nuevo germoplasma con tolerancia al estrés por sequía. Se estudio la adaptación agronómica a la sequía de 30 accesiones de maíz bajo tres regímenes hídricos, durante las épocas secas de enero-mayo 2020 y diciembre 2020-marzo 2021 en Zamorano, Honduras. Se evaluaron el rendimiento *per se*, índices de media geométrica y reducción del rendimiento, y rasgos secundarios utilizando un arreglo de parcelas divididas de un diseño alfa látice. Se encontraron diferencias significativas por efectos de las épocas, estrés hídrico, accesiones de germoplasma y la interacción estrés × accesión para el rendimiento, índices de sequía y algunos rasgos secundarios. Las accesiones criollas Capulín, Olotillo, Indio, Negro y Tuza Morada, presentaron un buen potencial de rendimiento y estabilidad a través de los estreses aplicados. Los caracteres secundarios mazorcas por planta ($r=0.76^{**}$), peso de cien semillas ($r=0.67^{**}$), senescencia foliar ($r=-0.58^{**}$), y aspecto de mazorca ($r=-0.83^{**}$) se correlacionaron con el rendimiento bajo estrés por sequía. Las accesiones seleccionadas y los rasgos secundarios asociados con rendimiento en condiciones de estrés podrán servir en futuros procesos de mejoramiento para desarrollar germoplasma de maíz tolerante a estrés de sequía.

Palabras clave: accesiones criollas, estrés por sequía, fenotipado, rasgos secundarios.

Agronomic performance of maize accessions from Honduras under drought stress

Abstract. Maize (*Zea mays* L.) is the most important crop for food security for most of the rural population in Central America. Low yields and regional challenges represented by climate change make it imperative to develop new germplasm with drought stress tolerance. The agronomic adaptation under drought was studied on 30 maize accessions under three water regimes during the dry seasons of January-May 2020 and December 2020-March 2021 in Zamorano, Honduras. Grain yield *per se*, geometric mean and yield reduction indexes and secondary traits were evaluated using a split-plot arrangement of an alpha-lattice design. Significant differences were found for the effects of season, drought stress, germplasm accessions, the interaction stress × accession, and some secondary traits. The landrace accessions Capulín, Olotillo, Indio, Negro and Tuza Morada, presented good grain yield and stability through the stresses applied. The secondary traits ears per plant ($r=0.76^{**}$), one hundred seeds weight ($r=0.67^{**}$), foliar senescence ($r=-0.58^{**}$), and cob aspect ($r=-0.83^{**}$), were correlated with grain yield under drought stress.

¹ Trabajo parcial de MJ Gómez-Cerna para optar el título de Maestría en Ciencias en Agricultura Tropical Sostenible, Universidad Zamorano, Honduras.

² Autor para correspondencia.

Selected accessions and secondary traits associated with grain yield under stress conditions may serve in future breeding processes to develop maize germplasm tolerant to drought stress.

Keywords: landrace accessions, drought tolerance, phenotyping, secondary traits.

Introducción

El maíz constituye la base para la seguridad alimentaria y nutricional (SAN) de la población mesoamericana, y representa el 61% de las calorías consumidas y una importante fuente de proteínas (Shiferaw et al., 2011; Poole et al., 2020). A pesar de la importancia del cultivo y los avances en el mejoramiento genético de las últimas décadas (Córdova et al., 2002), los bajos rendimientos representan el principal reto para los pequeños agricultores de la región. Para enfrentar los desafíos futuros asociados al cambio climático (CC) y al aumento de la demanda de alimentos derivado del incremento de la población, es imperativo implementar estrategias para impulsar la producción sostenible de este cultivo, potenciar sus contribuciones a la SAN y reducir la vulnerabilidad alimentaria de la población de la región (Dwivedi et al., 2017; Challinor et al., 2016; Prasanna et al., 2021).

Históricamente, la región Centroamericana es afectada por eventos hidro-meteorológicos extremos. Entre ellos, la sequía representa uno de los fenómenos que más impacta negativamente la producción agroalimentaria (Calvo-Solano et al., 2018). Para los próximos años, los modelos climáticos proyectan un aumento en las temperaturas, precipitaciones más erráticas e incremento de la evapotranspiración, factores que podrían provocar la intensificación de los impactos de la variabilidad climática en la agricultura familiar (Schmidt et al., 2012; Imbach et al., 2017) y sus efectos en la SAN a mayor escala (Hannah et al., 2017; Hansen et al., 2019).

En el Corredor Seco Centroamericano (CSC), los pequeños agricultores están mayormente localizados en ambientes marginales para el cultivo de maíz, bajo condiciones de temporal, en donde el estrés causado por sequía representa la principal amenaza de los sistemas de producción (Calvo-Solano et al., 2018). Bajo este contexto, los agricultores de subsistencia cuentan con pocas posibilidades de acceder a estrategias adecuadas para mitigar los efectos de la variabilidad climática interanual e inter estival, lo que repercute en la productividad de los sistemas de producción (Shiferaw et al., 2011; Araus et al., 2012; Edmeades et al., 2017; Eash et al., 2019; Prasanna et al., 2021).

El estrés por sequía afecta las características fisiológicas de la planta en casi todas las etapas de desarrollo, limitando las funciones reproductivas e impactando en el rendimiento (Bänziger et al., 2012), especialmente una semana antes y dos semanas después de la floración, las que representan las etapas más críticas (Grant et al., 1989). La sequía al momento de la floración se refleja en la esterilidad de las plantas o la producción de pocos granos (Edmeades et al., 1999; Araus et al., 2012). Lobell et al. (2011) sugieren que por cada grado día (GDD) acumulado >30 °C, se presenta una reducción del 1% el rendimiento en condiciones óptimas de temporal y en un 1.7% bajo estrés de sequía, condición que se podría exacerbar debido al incremento de las temperaturas derivadas del calentamiento global.

En condiciones de estrés por sequía, el rendimiento se vuelve irrelevante, por lo que la selección se puede enfocar en rasgos secundarios putativos de adaptación a la sequía (Edmeades et al., 1999, Araus et al., 2012). Un rasgo secundario podría dar mayores ganancias para el rasgo primario que la selección *per se* para el rendimiento. Los rasgos secundarios a menudo se usan en la selección y con frecuencia forman parte de un índice de selección junto con el rendimiento de grano (Falconer y Mackay, 1996). En el fenotipado, la identificación y medición de rasgos secundarios asociados con el rendimiento de grano proporciona una guía de mecanismos específicos que contribuyen al rendimiento bajo estrés por sequía (Campos et al., 2004).

Para propósitos de mejoramiento genético, un rasgo secundario debe estar genéticamente asociado al rendimiento bajo estrés y poseer mayor heredabilidad que el rendimiento, ser más barato y fácil de medir, preferiblemente observado antes o en la etapa de floración y no estar vinculado a la pérdida de rendimiento en condiciones sin estrés (Araus et al., 2012; Edmeades et al., 2017). Entre los principales caracteres secundarios utilizados en la selección para sequía, se encuentra el intervalo anthesis-estigmas (IPE), el cual ha mostrado alta correlación y heredabilidad con el rendimiento del grano en condiciones de sequía (Bolaños y Edmeades, 1996). La senescencia foliar (“stay green” en inglés) es otro carácter ampliamente estudiado, para este rasgo la selección se enfoca en materiales que permanecen verdes por

más tiempo durante la exposición al estrés, lo que podría indicar una característica de tolerancia a la sequía (Araus et al., 2012). Estudios realizados por Fischer et al. (1989), demostraron que esta característica fue efectiva para seleccionar genotipos tolerantes a sequía.

No cabe duda de que, en el contexto del CC los programas de mejoramiento genético enfrentan desafíos para acceder a la diversidad genética necesaria para abordar los estreses abióticos y el desarrollo de ciclos de selección en ambientes meta (Atlin et al., 2017). Además, bajo este contexto, se requiere incrementar la eficiencia de los programas de mejoramiento genético, en la búsqueda de estrategias efectivas para estabilizar la productividad en condiciones de variabilidad climática (Ceccarelli, 2015; Raggi et al., 2017). Considerando estos retos, es necesario explorar la diversidad genética disponible en la región, las cuales contienen una gran cantidad de alelos, haplotipos y combinaciones genéticas que podrían ser de utilidad para el mejoramiento genético y el desarrollo de cultivares en el futuro (Warburton et al., 2008; Shiferaw et al., 2011).

Los objetivos del presente estudio fueron (a) caracterizar fenotípicamente un grupo de accesiones criollas y variedades comerciales de maíz provenientes del Banco de Germoplasma de Zamorano (BGZ) bajo condiciones de sequía terminal, e (b) identificar los rasgos secundarios de mayor utilidad en el proceso de mejoramiento genético para la tolerancia a la sequía. Mediante este estudio, se identificaron fenotipos y los principales rasgos secundarios asociados con el rendimiento bajo estrés por sequía que podrían ser una guía para entender los mecanismos que confieren la tolerancia a este estrés abiótico.

Materiales y métodos

Para este estudio se seleccionó un grupo de 30 accesiones provenientes de la colección de maíz del Banco de Germoplasma de la Universidad Zamorano (BGZ), incluyendo 23 accesiones criollas o nativas y siete accesiones mejoradas (**Cuadro 1**). Las accesiones criollas evaluadas fueron colectadas en los departamentos de Cortés, Choluteca, Francisco Morazán, Intibucá, Lempira, Santa Bárbara y Yoro, en 1994 y 2019. Entre las accesiones mejoradas se incluyeron cinco variedades de polinización libre (VPL) utilizadas en Honduras y El Salvador, y dos VPL desarrolladas por métodos de fitomejoramiento participativo (FP) por la Fundación para la Investigación Participativa con Agricultores de Honduras (FIPAH). Las VPL Tuxpeño, DICTA Sequía y CENTA Pasaquina fueron utilizadas como testigos comerciales.

Los ensayos se establecieron en el área experimental de la Unidad de Investigación y Desarrollo de Cultivos de la Universidad Zamorano, localizada a 14°00'22.68" N, 86°59'45.20" W, altitud de 800 msnm, en el municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, Honduras. Los ensayos se condujeron en los lotes 20 y 27 de la Zona II de Zamorano, en un suelo alfisol typic haplustalf y lithic haplustalf con pH 6.01 y 6.31, respectivamente. Los experimentos se establecieron el 30 de enero 2020 y el 01 de diciembre del 2020, durante la época seca en la región. Se utilizó el módulo Wireless Vantage Pro2™ de DAVIS Instruments ubicado a 2 km de los experimentos, para coleccionar la información de las condiciones climáticas predominantes en la zona, entre ellas la precipitación pluvial (PP), humedad relativa (HR), temperatura máxima y mínima, registrados cada 30 min.

En los experimentos se utilizó un arreglo de parcelas divididas de un diseño alfa látice balanceado 5 x 6 con cuatro repeticiones. Los regímenes hídricos aplicados se distribuyeron en las parcelas y las accesiones en las subparcelas. El área experimental constó de dos surcos de 3 m de largo con una densidad de 44,444 plantas ha⁻¹. Se colocó una planta por postura y se utilizaron plántulas de 10 días de germinadas para asegurar la densidad y uniformidad poblacional de las parcelas experimentales.

Se aplicaron tres regímenes hídricos, sin estrés (SE), estrés moderado (EM) y estrés severo (ES), utilizando un sistema de riego por goteo. En el primer ensayo se aplicaron un total de 245 mm en el ES, 304 mm en EM y 401 mm en SE, mediante la suspensión de los riegos a los 60, 75 y 90 días después de siembra (DDS), respectivamente. En el segundo ensayo se aplicaron un total de 142.5 mm en el ES, 157 en el EM, y 307 mm en el SE, suspendiendo los riegos a los 51, 58 y 105 DDS, respectivamente.

En el primer ensayo, se monitoreo la humedad de suelo a partir de los 60 DDS, registrando la humedad a los 0.20 y 0.40 m de profundidad una vez por semana; y en el segundo ensayo, tres veces por semana a partir de los 51 DDS, registrando el contenido de humedad del suelo a los 0.20, 0.40 y 0.60 m de profundidad. Se utilizó el medidor de humedad TDR 150 de Fieldscout, Spectrum Technologies, Inc.

En ambos ensayos se aplicaron 24 kg ha⁻¹ de N, 48 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 24 kg ha⁻¹ de K₂O, al momento del trasplante y 130 kg de N en forma de Urea (CH₄N₂O), fraccionado en dos aplicaciones, dos y cuatro semanas después de la siembra. Se realizaron dos controles manuales de malezas y control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) mediante aplicaciones de Spinetoram (Exalt 6 SC) en dosis de 100 mL ha⁻¹ a los 35 DDS.

Cuadro 1. Código, nombre, localidad y departamento de colecta, y color de semilla de las accesiones de maíz utilizadas en la caracterización fenotípica para la tolerancia a sequía. Zamorano, Honduras.

No.	Código*	Nombre	Localidad	Departamento	Color
1	M0026	Taberón	Pueblito	Yoro	Blanco
2	M0028	Guanaco	Las Cañas	Yoro	Blanco
3	M0034	Taberón	San Diego	Yoro	Blanco
4	M0044	Maicito	ND	Choluteca	Blanco
5	M0071	Quirrirre	La Laguna	Cortés	Blanco
6	M0072	Negro	La Laguna	Cortés	Morado
7	M0074	Sintético	El Tablón	Cortés	Blanco
8	M0076	Amarillo Ligero	San Juan de Dios	Intibucá	Amarillo
9	M0077	Amarillo	Camasca	Intibucá	Amarillo
10	M0084	Negrito	San Juan de Dios	Intibucá	Azul
11	M0085	Joco	Camasca	Intibucá	Blanco
12	M0114	Pacaya	La Libertad	Lempira	Blanco
13	M0317	Tuza Morada	San Francisco	Choluteca	Blanco
14	M0318	Capulín	San Francisco	Choluteca	Blanco
15	M0319	Olotillo Mejorado	El Barro	Santa Bárbara	Blanco
16	M0320	Olote Rosado	La Buena Fe	Santa Bárbara	Blanco
17	M0321	Indio	Orocuina	Choluteca	Blanco
18	M0322	Olotillo	Orocuina	Choluteca	Blanco
19	M0323	Planta Baja	El Destino	Yoro	Blanco
20	M0324	Rojo precoz	San Antonio	Yoro	Rojo
22	M0325	Tizate	Concepción	Intibucá	Blanco
22	M0326	Amarillo	Concepción	Intibucá	Amarillo
23	M0327	Negro Concepción	Concepción	Intibucá	Negro
24	M0328	S11LTWHGAB08	Vallecillo	Fco. Morazán	Blanco
25	M0329	Sulaco 06	Yorito	Yoro	Blanco
26	TC1	Tuxpeño	NA	Honduras	Blanco
27	TC2	DICTA Sequia	NA	Honduras	Blanco
28	TC3	DICTA Maya	NA	Honduras	Blanco
29	TC4	DICTA Victoria	NA	Honduras	Amarillo
30	TC5	CENTA Pasaquina	NA	El Salvador	Blanco

* Las accesiones con código M provienen del Banco de Germoplasma de Zamorano, las accesiones TC1-TC4 son variedades comerciales de Honduras y TC5 es de El Salvador.

Las variables evaluadas en ambos ensayos fueron los días a floración masculina (DFM) de la siembra hasta que el 50% de las plantas liberaron polen, y los días a flor femenina (DFF), hasta que el 50% de las plantas mostraron estigmas de 2-3 cm de largo. El intervalo entre antesis y la aparición de los estigmas (IPE) se calculó como la diferencia entre los DFF y DFM. Para cada una de estas variables se estimaron las unidades en grados días (GDD). La altura de planta (ALP), se midió como la distancia desde la base de la planta hasta donde inicia la diferenciación de la espiga, y la altura de mazorca (ALM), hasta el nudo donde está ubicada la primera mazorca. La senescencia foliar (SNF) se registró a los 77 y 91 DDS, utilizando la escala visual de 0 (sin senescencia) a 9 (completamente senescente) para estimar el total del área foliar seca (Bänziger et al., 2012; Zaman-Allah et al., 2016).

El contenido relativo de clorofila (CRC) se registró entre los 80 y 90 DDS utilizando el MultispeQ de PhotosynQ Inc. El aspecto de la planta (ASP) se evaluó utilizando la escala de 1-5 (1= excelente y 5= deficiente) (CIMMYT, 1995). La cosecha se realizó de forma manual en una unidad experimental de 2.25 m², y se determinó el número de mazorcas por planta (MPP). Las plantas por metro cuadrado (PPM) se

obtuvo dividiendo el número de plantas cosechadas entre el área de la unidad experimental. El aspecto de mazorca (APM), se registró utilizando la escala de 1-5 (1 = mazorcas sanas, uniformes, con buen llenado de grano y buen tamaño; 5= mazorcas con características indeseables) (CIMMYT, 1995). Las mazorcas cosechadas de cada parcela se desgranaron para determinar el porcentaje de humedad (PHM), mientras que el índice de desgrane (IDM) se estimó dividiendo el peso de campo de los granos entre el de las mazorcas.

El rendimiento de grano (RDG) se ajustó al 14% de humedad y luego, se procedió a registrar el peso de cien semillas (PCS) de cada accesión, a partir de una muestra representativa de los granos obtenidos en la cosecha. Con los datos de rendimiento estimados para cada régimen hídrico se calculó la media geométrica de rendimiento $[MGR = (RES \times REM \times RSE)^{1/3}]$ según Fernández (1992), usando los datos de rendimientos de grano en parcelas con estrés severo (RES), estrés moderado (REM) y sin estrés (RSE). También se estimó el porcentaje de reducción del rendimiento (PRR) entre el RES y el RSE $(PRR = RES/RSE \times 100)$ según (Fernández, 1992). La heredabilidad en el sentido estrecho (h^2) se estimó mediante la relación entre la varianza genética y fenotípica $[h^2 = \sigma^2_g / \sigma^2_g + (\sigma^2_{\epsilon}/r)]$; siendo σ^2_g = varianza genotípica; σ^2_{ϵ} = suma de cuadrados del error; y r = número de repeticiones. Por otro lado, la heredabilidad en el sentido amplio (H) fue estimada utilizando la ecuación $H = \sigma^2_g / (\sigma^2_g + \sigma^2_{g \times e} / e + \sigma^2_{\epsilon}/r)$, en donde σ^2_g = varianza genotípica; $\sigma^2_{g \times e}$ = varianza genotipo x época, σ^2_{ϵ} = suma de cuadrados del error, r = repeticiones, y e = épocas.

Se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) para las variables evaluadas, luego se comprobó la homogeneidad de varianza del error, previo al análisis combinado de acuerdo con Bartlett (1947). En los análisis se consideraron los genotipos como efectos fijos y los demás efectos se consideraron aleatorios. Para el ANDEVA combinado de las dos épocas se utilizó el modelo $Y_{ijk} = v_i + m_j + vm_{ij} + s_k + e_{ijk}$, en donde Y_{ijk} = valor de respuesta de la i ésima accesión evaluada en el j ésimo régimen hídrico en la k ésima época, v_i = efecto fijo de la i ésima accesión, m_j = efecto del régimen hídrico, vm_{ij} = efecto de la interacción de la i ésima accesión y el j ésimo régimen aplicado, s_k = efecto aleatorio de la k ésima época, y e_{ijk} = error aleatorio.

Para el análisis de comparación de medias de las variables evaluadas se utilizó la diferencia mínima significativa (DMS) al nivel de probabilidad de 5%. Adicionalmente, se realizó análisis de componentes principales (ACP) y diagrama de dispersión utilizando el programa estadístico “InfoStat® versión 2020p” y un análisis mediante el coeficiente de correlación de Pearson utilizando el programa “Jamovi versión 1.1”.

Resultados

En general, durante el desarrollo de los ensayos, los acumulados de precipitación y evapotranspiración de referencia (ETo), así como el promedio de temperatura máxima, fueron más altos durante el primer ensayo (enero-mayo 2020), que en el segundo ensayo (diciembre 2020-marzo 2021). En el primer ensayo la precipitación total registrada fue de 70.3 mm, y en el segundo 20.5 mm, por lo que en ambos se complementó mediante riego por goteo cada parcela según los tratamientos de estrés hídrico. En el primer ensayo, se presentaron 17 días con temperaturas superiores a 34 °C y dos días con ETo superior a 5 mm⁻¹, mientras que, la HR promedio fue más alta en el segundo ensayo (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Condiciones climáticas registradas durante las dos épocas de siembra en que se condujeron los ensayos de fenotipado de 30 accesiones de maíz bajo tratamientos de estrés de sequía. Zamorano, Honduras, 2020-21.

Época	Precipitación	ETo (mm)	Promedio		Humedad relativa (%)	Número de días	
			Temperatura (°C)			Temperatura (> 34 °C)	ETo >5 (mm día ⁻¹)
			Max	Min			
Enero-mayo 2020	70.3	422	31.6	17.4	53.2	17	2
Dic 2020-mar 2021	20.6	357	27.6	17.0	71.0	0	0

En el ANDEVA combinado para el RDG en las dos épocas de siembra, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.0001$) debidos a los efectos simples de las épocas, el estrés hídrico y las accesiones, y

de la interacción estrés × accesión (**Cuadro 3**). El efecto de los tratamientos de estrés representó la mayor proporción de la variación total en los experimentos, seguido de la época de siembra.

Cuadro 3. Análisis de la varianza del rendimiento de grano (kg ha^{-1}) de 30 accesiones de maíz evaluadas bajo tres regímenes de estrés hídrico en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras, 2020-21.

Fuente	GL	CM	F	Valor P
Época	1	114121761.00	33.65	<0.0001
Estrés	2	360620324.00	737.43	<0.0001
Época>Estrés>Rep	18	3390980.54	6.93	<0.0001
Accesión	29	4970816.02	10.16	<0.0001
Época x Accesión	29	697433.94	1.43	0.0715 ^{ns}
Estrés x Accesión	58	1161386.89	2.37	<0.0001
Época x Estrés x Accesión	58	438332.94	0.90	0.6906
Error	515	489022.90		
Total	710			

^{ns} No significativo.

En el ANDEVA combinado del RDG de las dos épocas de siembra para los tratamientos sin estrés y estrés severo, se encontraron diferencias significativas en los cuadrados medios para los efectos simples de épocas de siembra y accesión, pero no para la interacción accesión × época. Las épocas representaron la principal fuente de variación para ambos regímenes hídricos, mientras que la interacción accesión × época, fue responsable de una porción menor de la variación total de los ensayos (**Cuadro 4**). Las variables fenotípicas presentaron diferencias debidas principalmente a los efectos de las épocas en la condición SE, las cuales fueron menores bajo ES. Los efectos de las accesiones se observaron en todas las variables en ambas condiciones, SE y ES. La AP fue el único carácter que presentó diferencias por efectos de época, accesión y la interacción época × accesión en los tratamientos SE y ES. En general bajo ES se presentaron menos diferencias en los rasgos fenotípicos que en la condición SE.

Cuadro 4. Cuadrados medios de rendimiento de grano, altura de planta (AP), intervalo antes y estigmas (IPE), senescencia foliar (SNF), aspecto de planta (ASP), aspecto de mazorca (APM), mazorcas por planta (MPP) y peso de cien semillas (PCS), de 30 accesiones de maíz bajo condiciones sin estrés (SE) y estrés hídrico severo (ES) en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras 2020-21.

Fuente de variación	Sin estrés							
	Rendimiento (kg ha^{-1})	AP	IPE	SNF	ASP	APM	MPP	PCS
Época	97915092.7**	63.1 ^{ns}	6.7 ^{ns}	10.2*	6.3**	1.2*	0.2 ^{ns}	16.0*
Época x repetición	1474123.1**	1554.1**	2.6*	1.1**	0.03 ^{ns}	0.1*	0.1 ^{ns}	2.4 ^{ns}
Accesión	4165015.9**	3883.5**	6.6**	0.6**	1.2**	0.8**	0.1**	82.6**
Accesión x época	544885.4 ^{ns}	161.2**	1.3 ^{ns}	0.4**	0.04*	0.1*	0.04 ^{ns}	6.2**
Error	404594.2	88.1	1.1	0.2	0.02	0.1	0.6	3.3
Heredabilidad	0.87	0.96	0.81	0.67	0.97	0.92	0.71	0.94
Fuente de variación	Estrés severo							
	Rendimiento (kg ha^{-1})	AP	IPE	SNF	ASP	APM	MPP	PCS
Época	32952765.9*	53337**	0.001 ^{ns}	59.2 ^{ns}	0.2 ^{ns}	1.1 ^{ns}	2.8**	632.6*
Época x repetición	4200850.5**	497 ^{ns}	6.2*	19.5**	0.2 ^{ns}	0.7**	0.1 ^{ns}	55.3*
Accesión	1290841.2**	1864**	10.8**	8.7**	0.8**	0.4**	0.1**	59.1**
Accesión x época	558071.9 ^{ns}	805**	2.7 ^{ns}	3.3 ^{ns}	0.2**	0.1 ^{ns}	0.1*	21.9 ^{ns}
Error	555879.5	391	2.5	2.4	0.1	0.2	0.1	19.1
Heredabilidad	0.66	0.73	0.77	0.72	0.85	0.71	0.63	0.71

Efecto del estrés hídrico en el rendimiento de grano y otros rasgos agronómicos

Se registraron diferencias significativas entre los rendimientos de las accesiones de maíz en cada uno de los tratamientos de estrés hídrico (**Cuadro 5**). Los promedios de RDG a través de los regímenes hídricos con base en las dos épocas de siembra presentaron diferencias entre las accesiones en la condición SE (4,257 kg ha⁻¹), EM (2,630 kg ha⁻¹) y ES (1829 kg ha⁻¹). Estas diferencias equivalen a una reducción del rendimiento promedio de las accesiones de 57% en el ES y de 38% para el EM con relación al rendimiento SE. De manera similar, la heredabilidad para el RDG disminuyó del tratamiento SE (0.87), al de EM (0.77) y ES (0.66). Por otro lado, el CV se incrementó de acuerdo con la intensidad del estrés hídrico, siendo el más alto en condiciones de ES.

Cuadro 5. Promedios de rendimiento de grano bajo condiciones sin estrés, estrés moderado y estrés severo, e índices de la media geométrica y el porcentaje de reducción de rendimiento de 30 accesiones de maíz en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras, 2020-21.

	Rendimiento (kg ha⁻¹)				
	Sin estrés	Estrés moderado	Estrés severo	Media geométrica	Reducción rendimiento (%)
Indio	5688	3159	2220	3416	61
Planta Baja	5268	2939	2153	3218	59
Capulín	5245	3423	2557	3581	51
DICTA Maya	5119	3074	1863	3083	64
CENTA Pasaquina	5011	3162	2261	3296	55
Tuxpeño	4995	2489	1758	2796	65
Sulaco 06	4910	2367	1658	2681	66
DICTA Victoria	4851	2616	1702	2785	65
Olotillo	4789	3598	2184	3351	54
DICTA Sequía	4643	3008	1735	2894	63
Olotillo Mejorado	4619	2969	2229	3127	52
Guanaco	4543	2743	1953	2898	57
Quirrirre	4432	2005	1033	2093	77
S11LTWHGAB08	4408	2516	1664	2642	62
Rojo Precoz	4365	2518	2209	2896	49
Olote Rosado	4306	1901	1602	2358	63
Joco	4275	2691	2124	2902	50
Sintético	4166	1979	1226	2162	71
Negro	4057	2922	2564	3121	37
Amarillo II	3924	2131	1631	2390	58
Tuza Morada	3632	3270	2366	3040	35
Maicito	3622	2812	1984	2724	45
Taberón I	3622	2706	1766	2587	51
Negrilo	3564	2570	1969	2622	45
Amarillo I	3462	2121	1404	2177	59
Tizate	3435	2626	1837	2550	47
Taberón II	3266	2421	1330	2191	59
Negro Concepción	3253	2484	1355	2220	58
Pacaya	3135	2090	1350	2068	57
Amarillo Ligero	3112	1588	1184	1802	62
Promedio	4257	2630	1829	2722	57
DMS (0.05)	628	621	752		
CV (%)	14.9	23.9	40.3		
Valor p accesiones	<0.01	<0.01	<0.01		
Valor p accesiones x época	0.12	0.24	0.47		
H ²	0.87	0.77	0.66		
R ²	0.78	0.61	0.55		

En cada uno de los tres regímenes de estrés hídricos aplicados se encontraron diferencias significativas entre las accesiones para todos los rasgos fenotípicos secundarios evaluados (**Cuadro 6**). Los estreses impuestos incidieron en el crecimiento vegetativo de las accesiones, el promedio de ALP se redujo del tratamiento SE (226 cm), a EM (216 cm), y ES (207 cm). Los días y grados días a la floración

femenina y masculina no fueron diferentes entre los estreses. El IPE se incrementó con la intensidad del estrés hídrico aplicado, aunque las diferencias entre el SE (1.6 días), EM (2.0) y ES (2.5) no parecen ser importantes. Los regímenes hídricos incrementaron la SNF de la condición SE ((1.5), EM (4.3) hasta ES (6.0). El número de MPP se redujo en la medida que se aplicaron los niveles de estrés hídrico, desde SE (1.2), a EM (0.9), hasta el ES (0.5). El PCS también fue afectado por la aplicación del estrés hídrico, el promedio disminuyó de las condiciones SE (27.7 g), al de ES (20.6 g).

Cuadro 6. Promedio (PM), diferencia mínima significativa (DMS) y coeficiente de variación (CV) de rasgos fenotípicos secundarios de 30 accesiones de maíz evaluadas bajo condiciones sin estrés, estrés moderado y estrés severo en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras 2020 y 2021.

Rasgo	Sin estrés			Estrés moderado			Estrés severo		
	PM	DMS (0.05)	CV (%)	PM	DMS (0.05)	CV (%)	PM	DMS (0.05)	CV (%)
Altura de planta (cm)	226.2	9.3**	4.2	215.9	11.4**	5.4	207.2	19.7**	9.6
Días a flor masculina	65.4	1.3**	2.1	65.9	1.5**	2.4	65.5	1.3**	1.9
Grados día a flor masculina	954.0	17.9**	1.9	960.4	22.2**	2.3	956.9	18.4**	1.9
Días a flor femenina	67.0	1.6**	2.4	67.8	1.8**	2.7	67.9	2.1**	3.1
Grados día a flor femenina	975.4	22.5**	2.3	989	27**	2.8	933.6	31.9**	3.2
Intervalo antesis y estigmas	1.6	1.0**	65.6	2.0	1.1**	57.3	2.5	1.6**	65.3
Senescencia foliar (0-9)	1.6	0.4**	25.5	4.3	0.8**	20	6.0	1.5**	25.9
Aspecto de planta (1-5)	3.2	0.1**	4.6	3.4	0.2**	5.9	3.6	0.3**	8.1
Aspecto de mazorca (1-5)	3.1	0.2**	7.0	3.5	0.3**	8.5	3.8	0.4**	10.0
Días a madurez fisiológica	102.8	1.8**	1.8	99.0	1.6**	1.6	97.1	2.3**	2.3
Mazorcas por planta	1.2	0.2**	14.4	1.0	0.1**	14.4	0.9	0.2**	25.3
Peso de cien semillas (g)	27.7	1.8**	6.5	22.9	2.2**	9.9	20.7	4.4**	21.0

Relaciones entre el rendimiento de grano y rasgos secundarios bajo estrés de sequía

Los rendimientos de grano de los tratamientos de SE, EM y ES estuvieron correlacionados de manera positiva entre ellos y con la media geométrica, y presentaron correlación negativa con el porcentaje de reducción de rendimiento (**Cuadro 7**). Aunque hubo diferencias en el orden de comportamiento de las accesiones bajo cada estrés, un grupo de accesiones fueron superiores a través de los estreses hídricos.

Cuadro 7. Matriz de correlaciones (r) del rendimiento de grano (kg ha⁻¹) en los tratamientos de estrés hídrico y los índices de la media geométrica y la reducción de rendimiento de 30 accesiones de maíz en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras, 2021.

	Sin estrés	Estrés moderado	Estrés severo	Media geométrica
Sin estrés	—			
Estrés moderado	0.52**	—		
Estrés severo	0.46*	0.82**	—	
Media geométrica	0.74**	0.91**	0.91**	—
Reducción de rendimiento (%)	0.30 ^{ns}	-0.47**	-0.69**	-0.38*

*, **, ^{ns} Diferencias significativas al P≤ 0.05, P≤ 0.01, y no significativo, respectivamente.

La mayoría de las correlaciones entre el rendimiento de grano y los rasgos fenotípicos secundarios bajo los tratamientos de estrés hídrico fueron negativas y se incrementaron según la intensidad del estrés (**Cuadro 8**). Los rasgos APM, SNF y ASP mostraron las correlaciones más altas con el RDG en condiciones de ES. Los caracteres de MPP y PCS se correlacionaron positivamente con el RDG, incrementando la correlación en la medida que se acentuó el estrés. Algunas variaciones en la tendencia de las correlaciones se presentaron en rasgos como ALP, DMF, y SNF.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y características fenológicas, morfológicas y componentes de rendimiento de 30 accesiones de maíz evaluadas bajo tres regímenes de estrés hídrico en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras 2020-21.

Rasgo	Correlación (r) con rendimiento de grano		
	Sin estrés	Estrés moderado	Estrés severo
Intervalo entre antesis y estigmas	-0.35**	-0.41**	-0.40**
Grados día de intervalo de antesis y estigmas	-0.35**	-0.42**	-0.40**
Altura de planta (cm)	0.09 ^{ns}	-0.22**	-0.07 ^{ns}
Días a madurez fisiológica	0.44**	-0.02 ^{ns}	0.28**
Grados días a madurez fisiológica	-0.17**	-0.27**	0.02 ^{ns}
Senescencia foliar	-0.46**	-0.18**	-0.58**
Aspecto planta (1-5)	-0.17**	-0.44**	-0.56**
Mazorcas por planta	0.36**	0.52**	0.76**
Aspecto de mazorca (1-5)	-0.57**	-0.66**	-0.83**
Peso de cien semillas	0.06 ^{ns}	0.53**	0.67**
Media geométrica	0.74**	0.91**	0.91**
Reducción de rendimiento	0.30 ^{ns}	-0.47**	-0.69**

Las correlaciones entre los rasgos fenotípicos presentaron valores positivos o negativos dependiendo de las relaciones específicas y el efecto del estrés aplicado (**Cuadro 9**). Bajo ES el número de MPP presentó correlaciones negativas con el IPE, SNF, ASP y APM, y positiva con PCS. En cambio, la SNF se asoció positivamente con el IPE, ASP y APM y de forma negativa con MPP y PCS. En general, en las condiciones SE los rasgos secundarios evaluados mostraron niveles de correlación más bajos, y en algunos casos no existió correlación. Bajo esta condición, el número de MPP se correlacionó negativamente con el IPE, SNF, ASP y PCS, pero no se correlacionó con APM. Por su parte el rasgo de SNF mostró correlaciones positivas con el IPE y APM, y negativa con el número de MPP, y sin correlación con ASP y PCS.

Cuadro 9. Coeficientes de Pearson (r) entre los rasgos secundarios de 30 accesiones evaluadas bajo condiciones de estrés severo de sequía (diagonal inferior) y sin estrés (diagonal superior) en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras, 2020-21.

	Intervalo antesis y estigmas	Senescencia foliar	Aspecto de planta	Aspecto de mazorca	Mazorcas por planta	Peso de cien semillas
Intervalo antesis y estigmas	-	0.24**	0.39**	0.41**	-0.26**	0.15**
Senescencia foliar	0.44**	-	-0.01 ^{ns}	0.19**	-0.25**	0.01 ^{ns}
Aspecto de Planta	0.48**	0.60**	-	0.62**	-0.15*	-0.42**
Aspecto de Mazorca	0.49**	0.60**	0.69**	-	-0.07 ^{ns}	0.10 ^{ns}
Mazorcas por planta	-0.38**	-0.44**	-0.39**	-0.60**	-	-0.14*
Peso de cien semillas	-0.18**	-0.33**	-0.27**	-0.47**	0.46**	-

Accesiones de maíz tolerantes al estrés de sequía

En el gráfico de dispersión del rendimiento de grano de las accesiones de maíz bajo los regímenes de SE y ES, se observa que las accesiones criollas Indio, Capulín, Planta Baja y Olotillo, y la mejorada CENTA Pasaquina, localizadas en el cuadrante superior derecho, mostraron un rendimiento superior bajo ambos estreses (**Figura 1**). En condiciones de ES las accesiones Negro y Capulín, presentaron los mejores rendimientos, seguidas de Tuza Morada y otras mencionadas anteriormente. Entre las variedades comerciales incluidas en el estudio, CENTA Pasaquina se destacó por su mejor desempeño a través de los tratamientos de estrés. Las variedades Tuxpeño, DICTA Maya, DICTA Sequía y DICTA Victoria se ubicaron alrededor del promedio de todas las accesiones bajo ES, pero se comportaron bastante bien en condiciones SE, aunque por debajo de algunas de las criollas.

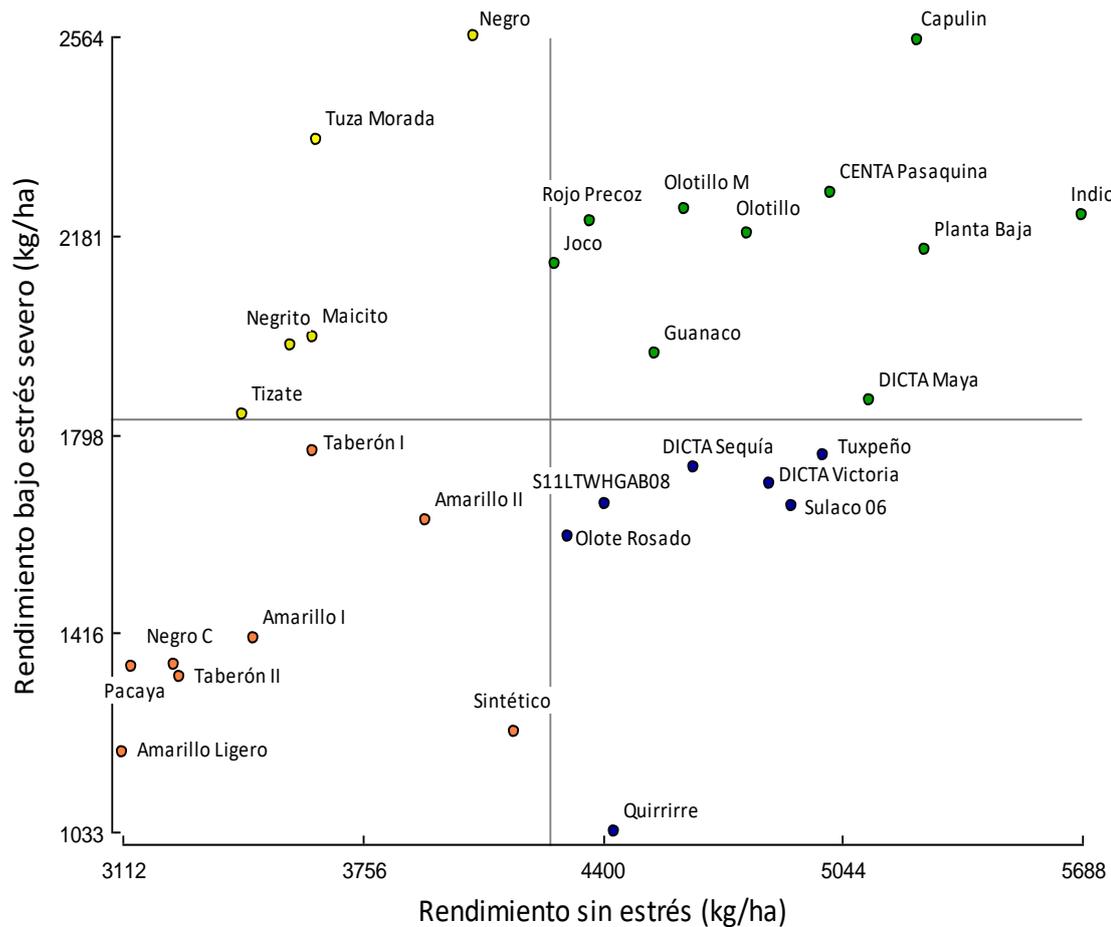


Figura 1. Comparaciones del rendimiento promedio (kg ha^{-1}) de 30 accesiones de maíz bajo condiciones de estrés severo y sin estrés hídrico en dos épocas de siembra. Zamorano, Honduras, 2020-21.

Discusión

Los regímenes hídricos aplicados afectaron significativamente el rendimiento de grano y fueron efectivos para identificar accesiones con tolerancia a la sequía (**Cuadro 3**). Los efectos ambientales reportados provocaron altos coeficientes de variación los cuales son bastante comunes en estudios bajo estrés de sequía. Los resultados obtenidos confirman que en estudios de interacción genotipo \times ambiente, el ambiente es responsable de los valores más altos en los componentes de la varianza en comparación al de los genotipos (Badu-Apraku et al., 2013; Badu-Apraku et al., 2015; Setimela et al., 2017).

El RDG y los rasgos IPE, SNF, APM y PCS no fueron afectados por la interacción accesión \times época bajo ES (**Cuadro 4**), por lo que las correlaciones entre ellos se espera que no se reduzcan bajo estrés hídrico (Badu-Apraku et al., 2011). También, la falta de interacción accesión \times época, evidencia la consistencia en el comportamiento de las accesiones bajo los regímenes hídricos en las dos épocas de evaluación, como resultado de condiciones de manejo y ambientes similares. Este hallazgo sugiere que la metodología de fenotipado utilizada en las condiciones del estudio fueron confiables y pueden ser replicables (Badu-Apraku et al., 2013). Las diferencias significativas entre las accesiones y el efecto de la interacción estrés \times accesión en el RDG sugieren la posibilidad de selección de algunos materiales específicos. No obstante, al considerar la variabilidad climática interanual y la naturaleza cuantitativa de la tolerancia a sequía es necesaria en la evaluación de las accesiones promisorias a través de los años y en distintos ambientes (Badu-Apraku y Akinwale, 2011; Badu-Apraku et al., 2013; Zaman-Allah et al., 2016).

El rendimiento promedio del tratamiento SE ($4,257 \text{ kg ha}^{-1}$), se redujo significativamente bajo ES ($1,829 \text{ kg ha}^{-1}$), lo que es de esperarse bajo estrés de sequía (Bänziger et al., 2012), y sugiere que las

diferencias en rendimientos observados entre las accesiones bajo ES son atribuidos a la tolerancia al estrés por sequía de algunas accesiones (Bänziger et al., 2002). Los RDG bajo ES y EM se correlacionaron positivamente con el rendimiento SE, en concordancia con estudios previos de estrés abiótico (Bänziger et al., 1997; Cairns et al., 2013). No obstante, según algunos autores esta correlación no es lo suficientemente fuerte para indicar que los rendimientos bajo condiciones óptimas pueden ayudar a predecir el rendimiento bajo estrés por sequía de un grupo de accesiones (Cairns et al., 2013; Trachsel et al., 2016a).

Basados en las altas correlaciones entre la MGR y el PRR con el RDG bajo ES y EM, se podría inferir que ambos índices pueden ser de utilidad para seleccionar accesiones de maíz que muestren mejor tolerancia al estrés hídrico, resultados similares a lo reportado por otros autores en estudios de fenotipado para tolerancia a sequía en frijol común (Porch et al., 2009; Boicet-Fabre et al., 2018). En el caso de la MGR, su efectividad radica en que, al contrario de la media aritmética, es menos sensible a diferencias marcadas observadas entre el rendimiento bajo condiciones óptimas y bajo estrés (Fernández, 1992).

Para la ALP, se encontró diferencias significativas entre épocas tanto para condiciones de ES y SE. Sin embargo, el análisis de correlación no mostró correlación entre el RDG y la ALP bajo ambas condiciones (**Cuadro 8**). Esto comprueba que el crecimiento de las plantas fue distinto para las accesiones en las épocas de evaluación, pero su impacto no fue significativo en el RDG, contrario a lo reportado por otros autores (Bolaños y Edmeades, 1996; Chen et al., 2012; Badu Apraku et al. 2013; Trachsel et al. 2016a).

Las diferencias en los promedios del IPE bajo ES, EM, y SE (**Cuadro 6**), sugiere que el estrés aplicado no fue lo suficientemente efectivo para discriminar accesiones con mejor tolerancia al estrés por sequía basados en este rasgo (Edmeades et al., 1993; Bolaños y Edmeades, 1996). La poca diferencia entre los días a antesis y la emisión de estigmas determinada por el valor de IPE, confirman lo propuesto por algunos autores, quienes sugieren que en casos en donde la diferencia de antesis y emisión de estigmas es corta, el uso del IPE se vuelve poco preciso y no es muy útil como rasgo secundario para el mejoramiento genético (Araus et al., 2012).

El IPE presentó una correlación negativa de baja intensidad con el RDG, de forma consistente a través de los tres regímenes hídricos, que se incrementó levemente a medida que se aumentó el estrés hídrico, similar con los resultados reportados por Masuka et al. (2017), Bolaños y Edmeades (1996) y Trachsel et al. (2016a). Las accesiones mejoradas incluidas en el estudio mostraron promedios de IPE entre 0.13 y 1.75 días bajo ES, lo que evidencia la efectividad del mejoramiento genético realizado por CIMMYT para reducir el IPE en estos genotipos (Edmeades et al. 1999). Los valores altos del IPE especialmente de accesiones criollas y la correlación negativa entre el IPE y RDG, sugieren que es necesario optimizar esta característica en estos materiales, como estrategia para mejorar su potencial de rendimiento bajo estrés de sequía (Bolaños y Edmeades, 1996; Masuka et al., 2017). Por su parte, para las accesiones precoces, se podría mejorar su potencial de rendimiento incrementando el vigor temprano de la población bajo selección (Trachsel et al. 2016b).

La SNF se vio afectada por los niveles de estrés hídrico aplicados. La heredabilidad para este rasgo fue desde 0.67, 0.84 y 0.72 para los regímenes SE, EM y ES, respectivamente, similar a los reportado por Ziyomo y Bernardo (2013). La correlación negativa entre SNF y RDG bajo ES evidencia la utilidad de este rasgo para seleccionar accesiones con potencial para tolerar estrés hídrico (Bolaños y Edmeades, 1996; Ziyomo y Bernardo, 2013). Para propósito de mejoramiento, las accesiones que mostraron valores bajos de SNF o senescencia tardía, podrían tener un buen potencial de rendimiento, por poseer la capacidad de producir más foto-asimilados bajo condiciones de estrés por sequía y utilizarlos en la formación de mazorcas y granos (Bänziger et al., 1999).

El número promedio de MPP se redujo en la medida que se aplicaron los niveles de estrés. En cambio, los valores de heredabilidad de MPP se mantuvieron relativamente similares a través de los regímenes SE (0.71) y ES (0.63), similar a lo reportado por Bolaños y Edmeades (1993a) y Trachsel et al. (2016b). Por su parte la correlación positiva entre el número de MPP y RDG se incrementó en la medida que se acentuaron los regímenes hídricos, lo que es consistente con lo reportado por otros autores (Bolaños y Edmeades, 1993a; Trachsel et al. 2016a; Badu-Apraku et al. 2013).

Este estudio confirma lo propuesto por Bänziger y Lafitte (1997), quienes sugieren que en algunas condiciones el número de MPP y el IPE son rasgos relacionados especialmente bajo ES ($r = -0.38^{**}$). No obstante, este hallazgo debe tomarse con cautela, considerando que al analizar el IPE y sus valores, se evidenció que los niveles de estrés aplicados no mostraron la intensidad necesaria para provocar mayor distanciamiento entre la antesis y la emisión de estigmas, limitando la posibilidad de discriminar accesiones por su IPE. Así, el estrés hídrico aplicado pudo haber provocado reducción en el número de MPP especialmente en accesiones de floración intermedia y tardía, afectándolos en la etapa de formación de grano (Bolaños y Edmeades, 1993b; Trachsel et al., 2016a).

La correlación negativa entre ASP y APM con el RDG bajo ES, muestra su utilidad como rasgo secundario para identificar accesiones con tolerancia a sequía. En el caso del APM, la fuerte asociación con el RDG está relacionada a la escala utilizada para evaluar este rasgo, la cual se conforma en parte por los componentes de rendimiento, lo que evidencia la dependencia entre este rasgo y el RDG (Blum, 1982). Por su parte, la similitud entre la correlación de la SNF y ASP con el RDG y la asociación entre ambos rasgos ($r = 0.60^{**}$) bajo ES, está relacionada al uso de la escala para evaluar ASP, que integra caracteres morfológicos asociados con SNF. Los resultados están en concordancia con lo reportado por Badu-Apraku y Akinwale (2011) y Badu-Apraku et al. (2012 y 2013) y sugieren que ambos rasgos pueden ser útiles para identificar fenotipos tolerantes a sequía.

La correlación entre el PCS y RDG bajo ES fue positiva con intensidad media, mostrando la utilidad del PCS como rasgo secundario. El PCS también se correlacionó con el número de MPP, bajo ES, y siguió una tendencia similar a través de los regímenes hídricos aplicados. Los resultados son consistentes con los reportados por Bolaños y Edmeades (1993a y 1996) y evidenció la fuerte asociación entre ambos caracteres por ser componentes del rendimiento. La relación entre el número de MPP y PCS con el rendimiento, explicó la variación del RDG en la medida que el estrés fue impuesto cercano a la floración, lo que muestra la sensibilidad del maíz al estrés en esta etapa del cultivo (Edmeades et al., 1999).

La MGR y el PRR permitieron identificar las accesiones Capulín, Negro, Olotillo, Indio y Tuza Morada, por su tolerancia a sequía. Estas accesiones han mostrado buen desempeño en rasgos secundarios bajo los distintos estreses aplicados, dando confianza al uso de la MGR como índice superior para la evaluación de germoplasma sin estrés y con estrés severo (Porch et al., 2009; Chaves-Barrantes et al., 2018). Además, estas accesiones pueden ser utilizadas como base genética para el desarrollo de futuras variedades con tolerancia a sequía, en particular germoplasma con madurez temprana.

Al analizar el ranking de RDG en ambientes contrastantes, encontramos que las accesiones Negro, Capulín, Tuza Morada, Olotillo Mejorado, Olotillo, Indio, Planta Baja, Rojo Precoz y Joco, mostraron un RDG igual o superior a los testigos en condiciones de ES. Adicionalmente, las accesiones Indio, Planta Baja, Capulín y Olotillo, también tuvieron un RDG igual o superior a los testigos en las condiciones SE. La estabilidad en el rendimiento mostrada por estas accesiones a través de los tratamientos de estrés y las épocas de evaluación podría depender de diferentes mecanismos fisiológicos identificados en ellas. La capacidad de mantener el follaje verde, el bajo valor del IPE, una arquitectura de planta compacta y un adecuado PCS, son algunos de los atributos que contribuyen a sostener el rendimiento en condiciones de estrés por sequía (Badu-Apraku y Akinwale, 2011; Trachsel et al., 2016a).

En este estudio, la baja densidad de siembra utilizada pudo haber condicionado el rendimiento de las accesiones mejoradas incluidas como testigos (Duvick, 2005). Sin embargo, más allá de la densidad de siembra utilizada, los resultados obtenidos con los testigos comerciales podrían confirmar lo propuesto por Atlin et al. (2017), quienes establecen que, en los países en vías de desarrollo, la falta de respuesta de la mayoría del germoplasma comercial a las condiciones ambientales actuales está asociada con la selección en épocas y ambientes poco similares a los que enfrentan en la actualidad. Esto evidencia la necesidad de evaluación fenotípica en múltiples ambientes que permita desarrollar germoplasma que responda a los desafíos climáticos actuales (Ceccarelli, 2015).

Por otra parte, bajo las condiciones de estrés aplicadas en las dos épocas, las accesiones con madurez temprana pudieron usar el mecanismo de escape al estrés. Las temperaturas altas superiores a los 33 °C que se presentaron durante los 67-78 DDS, pudo tener un efecto negativo, afectando la floración de los materiales de madurez tardía y limitando la formación y llenado de grano (Edmeades et al., 1999). Independientemente de los efectos ambientales, el estudio permitió identificar una gama de fenotipos

que podrían ser la base para el desarrollo de nuevo germoplasma con madurez temprana y tolerancia a sequía, los cuales poseen mecanismos diferenciados de tolerancia a sequía (Badu-Apraku et al., 2012). Este tipo de germoplasma es particularmente útil en ambientes con alta variabilidad climática interanual e inter-estival, donde prevalece la sequía terminal (Badu-Apraku et al., 2013; Calvo Solano et al., 2018).

Conclusiones

Los índices de tolerancia a sequía utilizados en combinación con los rasgos secundarios fueron útiles para identificar las accesiones Capulín, Indio, Olotillo, Planta Baja y Olotillo Mejorado por su tolerancia al estrés por sequía y estabilidad a través de los regímenes hídricos aplicados y las épocas de evaluación. El hecho de que otras accesiones criollas mostraran rendimiento de grano sin diferencias estadísticas en comparación a los testigos comerciales utilizados, indica el potencial que tiene el grupo de accesiones para desarrollar cultivares con un rendimiento mejorado para el estrés causado por la sequía.

Los rasgos secundarios de mayor correlación con el RDG y con valores de heredabilidad más altos bajo estrés de sequía, fueron SNF, MPP, PCS, ASP y APM. Estos rasgos, de forma individual o incluidos en un índice, podrían contribuir a la selección bajo estrés por sequía dentro del programa de mejoramiento del cultivo de maíz en Zamorano. Tomando en cuenta estas consideraciones, la selección futura de genotipos tolerantes, debería considerar accesiones con senescencia tardía, bajos valores de IPE y con más de una MPP bajo condiciones de estrés por sequía.

Literatura citada

- Araus JL, Serret MD, Edmeades GO. 2012. Phenotyping maize for adaptation to drought. *Frontier Physiol.* 3:305. eng. doi:10.3389/fphys.2012.00305.
- Atlin GN, Cairns JE, Das B. 2017. Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. *Global Food Security* 12:31–37. eng. doi:10.1016/j.gfs.2017.01.008.
- Badu-Apraku B, Akinwale R. 2011. Identification of early-maturing maize inbred lines based on multiple traits under drought and low N environments for hybrid development and population improvement. *Can. J. Plant Sci.* 91(5):931–942. doi:10.4141/cjps2010-021.
- Badu-Apraku B, Akinwale RO, Ajala SO, Menkir A, Fakorede MAB, Oyekunle M. 2011. Relationships among Traits of Tropical Early Maize Cultivars in Contrasting Environments. *Agronomy Journal* 103(3):717–729. doi:10.2134/agronj2010.0484.
- Badu-Apraku B, Akinwale RO, Franco J, Oyekunle M. 2012. Assessment of reliability of secondary traits in selecting for improved grain yield in drought and low-nitrogen environments. *Crop Sci.* 52(5):2050–2062. doi:10.2135/cropsci2011.12.0629.
- Badu-Apraku B, Fakorede MAB, Oyekunle M, Yallou GC, Obeng-Antwi K, Haruna A, Usman IS, Akinwale RO. 2015. Gains in grain yield of early maize cultivars developed during three breeding eras under multiple environments. *Crop Sci.* 55(2):527–539. doi:10.2135/cropsci2013.11.0783.
- Badu-Apraku B, Oyekunle M, Menkir A, Obeng-Antwi K, Yallou CG, Usman IS, Alidu H. 2013. Comparative performance of early-maturing maize cultivars developed in three eras under drought stress and well-watered environments in West Africa. *Crop Sci.* 53(4):1298–1311. doi:10.2135/cropsci2012.11.0640.
- Bänziger M, Betrán FJ, Lafitte HR. 1997. Efficiency of High-Nitrogen Selection Environments for Improving Maize for Low-Nitrogen Target Environments. *Crop Sci.* 37(4):1103–1109. doi:10.2135/cropsci1997.0011183X003700040012x.
- Bänziger M, Edmeades GO, Lafitte HR. 1999. Selection for drought tolerance increases maize yields across a range of nitrogen levels. *Crop Sci.* 39(4):1035–1040. doi:10.2135/cropsci1999.0011183X003900040012x.
- Bänziger M, Lafitte HR. 1997. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37(4):1110–1117. doi:10.2135/cropsci1997.0011183X003700040013x.
- Bänziger M, Edmeades GO, and Lafitte HR. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Res.* 75:223–233. doi:10.1016/S0378-4290(02)00028-X
- Bänziger M, Edmeades GO, Beck D, Bellon Mauricio. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz: de la teoría a la práctica. Mexico, D.F.: CIMMYT. ISBN: 978-607-95844-4-3.
- Bartlett MS. 1947. The use of transformations. *Biometrics.* 3(1):39. doi:10.2307/3001536.

- Blum A. 1982. Evidence of genetic variability in drought resistance and its implications for plant breeding. In: *Drought resistance in crops with emphasis on rice*. IRRI, Los Baños, The Philippines; [consultado el 4 de jul. de 2021]. 53–68. http://books.irri.org/9711040786_content.pdf.
- Boicet-Fabre T, Baldaquín-Hernández M, Boudet-Antomarchi AD, Merino-Hernández Y, Alarcón-Zayas A, Almarales-Frías W. 2018. Evaluación de diferentes índices de tolerancia a la sequía basado en análisis multivariados. *Cultivos Tropicales* 39(1):61–67. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000100007&lng=es&tlng=es.
- Bolaños J, Edmeades GO. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Research* 31(3-4):233–252. doi:10.1016/0378-4290(93)90064-T.
- Bolaños J, Edmeades GO. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior. *Field Crops Research* 31(3-4):253–268. doi:10.1016/0378-4290(93)90065-U.
- Bolaños J, Edmeades GO. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48(1):65–80. doi:10.1016/0378-4290(96)00036-6.
- Cairns JE, Crossa J, Zaidi PH, Grudloyma P, Sanchez C, Araus JL, Thaitad S, Makumbi D, Magorokosho C, Bänziger M, et al. 2013. Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize. *Crop Sci.* 53(4):1335–1346. doi:10.2135/cropsci2012.09.0545.
- Calvo-Solano OD, Quesada-Hernández LE, Hidalgo H, Gotlieb Y. 2018. Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agron. Mesoamericana* 29(3):695. doi:10.15517/ma.v29i3.30828.
- Campos H, Cooper M, Habben JE, Edmeades GO, Schussler JR. 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research* 90(1):19–34. doi:10.1016/j.fcr.2004.07.003.
- Ceccarelli S. 2015. Efficiency of plant breeding. *Crop Sci.* 55(1):87–97. doi:10.2135/cropsci2014.02.0158.
- [CIMMYT] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1995. Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT. Mexico, D.F.: CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/3792>.
- Challinor AJ, Koehler A-K, Ramirez-Villegas J, Whitfield S, Das B. 2016. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *Nature Clim. Change* 6(10):954–958. doi:10.1038/NCLIMATE3061.
- Chaves-Barrantes NF, Polanía JA, Muñoz-Perea CG, Rao IM, Beebe SE. 2018. Caracterización fenotípica por resistencia a sequía terminal de germoplasma de frijol común. *Agron. Mesoamericana* 29(1):1. doi:10.15517/ma.v29i1.27618.
- Chen J, Xu W, Velten J, Xin Z, Stout J. 2012. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *Journal of Soil and Water Conservation* 67(5):354–364. doi:10.2489/jswc.67.5.354.
- Córdova H, Castellanos S, Barreto H, Bolaños J. 2002. Veinticinco años de mejoramiento en los sistemas de maíz en Centroamérica: Logros y estrategias hacia el año 2000. *Agronomía Mesoamericana* 13(1):73–84. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43713114>.
- Duvick, D.N. 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 50:193–200.
- Dwivedi SL, van Lammerts Bueren ET, Ceccarelli S, Grando S, Upadhyaya HD, Ortiz R. 2017. Diversifying food systems in the pursuit of sustainable food production and healthy diets. *Trends Plant Sci.* 22(10):842–856. eng. doi:10.1016/j.tplants.2017.06.011.
- Eash L, Fonte SJ, Sonder K, Honsdorf N, Schmidt A, Govaerts B, Verhulst N. 2019. Factors contributing to maize and bean yield gaps in Central America vary with site and agroecological conditions. *J. Agric. Sci.* 157(04):300–317. doi:10.1017/S0021859619000571.
- Edmeades GO, Bolaños J, Chapman SC, Lafitte HR, Bänziger M. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop Sci.* 39(5):1306–1315. doi:10.2135/cropsci1999.3951306x.
- Edmeades GO, Bolaños J, Hernández M, Bello S. 1993. Causes for silk delay in a lowland tropical maize population. *Crop Sci.* 33(5):1029–1035. doi:10.2135/cropsci1993.0011183X003300050031x.
- Edmeades GO, Trevisan W, Prasanna BM, Campos H. 2017. *Tropical Maize (Zea mays L.)*. En: Campos H, Caligari PDS (eds.). *Genetic Improvement of Tropical Crops*. 1st ed. 2017. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer. p. 57–109.
- Falconer DS, Mackay TFC. 1996. *Introduction to quantitative genetics*. 4. ed. Harlow: Longman. xv, 464 s. ISBN: 0582243025.
- Fernandez GC. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo CG (ed.) *Adaptation of food crops to temperature and water stress: Proceedings of the International*

- Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Taiwan, 13-16 Agosto, 1992.
- Fischer KS, Edmeades GO, Johnson EC. 1989. Selection for the improvement of maize yield under moisture-deficits. *Field Crops Research* 22(3):227–243. doi:10.1016/0378-4290(89)90094-4.
- Grant RF, Jackson BS, Kiniry JR, Arkin GF. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal* 81(1):61–65. doi:10.2134/agronj1989.00021962008100010011x.
- Hannah L, Donatti CI, Harvey CA, Alfaro E, Rodriguez DA, Bouroncle C, Castellanos E, Diaz F, Fung E, Hidalgo HG, et al. 2017. Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change* 141(1):29–45. doi:10.1007/s10584-016-1867-y.
- Hansen J, Hellin J, Rosenstock T, Fisher E, Cairns J, Stirling C, Lamanna C, van Etten J, Rose A, Campbell B. 2019. Climate risk management and rural poverty reduction. *Agricultural Systems* 172(2):28–46. doi:10.1016/j.agsy.2018.01.019.
- Imbach P, Beardsley M, Bouroncle C, Medellín C, Läderach P, Hidalgo H, Alfaro E, van Etten J, Allan R, Hemming D, et al. 2017. Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change* 141(1):1–12. doi:10.1007/s10584-017-1920-5.
- Lobell DB, Bänziger M, Magorokosho C, Vivek B. 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change* 1(1):42–45. doi:10.1038/nclimate1043.
- Masuka B, Magorokosho C, Olsen M, Atlin GN, Bänziger M, Pixley KV, Vivek BS, Labuschagne M, Matemba-Mutasa R, Burgueño J, et al. 2017. Gains in maize genetic improvement in Eastern and Southern Africa: II. CIMMYT Open-Pollinated Variety Breeding Pipeline. *Crop Sci.* 57(1):180–191. doi:10.2135/cropsci2016.05.0408.
- Poole N, Donovan J, Erenstein O. 2020. Agri-nutrition research: Revisiting the contribution of maize and wheat to human nutrition and health. *Food Policy* 101976. eng. doi:10.1016/j.foodpol.2020.101976.
- Porch TG, Ramirez VH, Santana D, Harmsen EW. 2009. Evaluation of common bean for drought tolerance in Juana Diaz, Puerto Rico. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195(5):328–334. doi:10.1111/j.1439-037X.2009.00375.x.
- Prasanna B, M., Cairns JE, Zaidi PH, Beyene Y, Makumbi D, Gowda M, Magorokosho C, Zaman-Allah M, Olsen M, et al. 2021. Beat the stress: breeding for climate resilience in maize for the tropical rainfed environments. *Theor Appl Genet.* eng. doi:10.1007/s00122-021-03773-7.
- Raggi L, Ciancaleoni S, Torricelli R, Terzi V, Ceccarelli S, Negri V. 2017. Evolutionary breeding for sustainable agriculture: Selection and multi-environmental evaluation of barley populations and lines. *Field Crops Research* 204:76–88. doi:10.1016/j.fcr.2017.01.011.
- Schmidt A, Eitzinger A, Sonder J., Sain G. 2012. Tortillas en el comal (ToR): los sistemas de maíz y frijoles de América Central y el clima cambiante. México, D.F.: CIMMYT. 127 p. <http://hdl.handle.net/10883/4220>.
- Setimela PS, Magorokosho C, Lunduka R, Gasura E, Makumbi D, Tarekegne A, Cairns JE, Ndhlela T, Erenstein O, Mwangi W. 2017. On-Farm yield gains with stress-tolerant maize in Eastern and Southern Africa. *Agronomy Journal* 109(2):406–417. doi:10.2134/agronj2015.0540.
- Shiferaw B, Prasanna BM, Hellin J, Bänziger M. 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Sec.* 3(3):307–327. doi:10.1007/s12571-011-0140-5.
- Trachsel S, Leyva M, Lopez M, Suarez EA, Mendoza A, Montiel NG, Macias MS, Burgueno J, San Vicente F. 2016a. Identification of tropical maize germplasm with tolerance to drought, nitrogen deficiency, and combined heat and drought stresses. *Crop Sci.* 56(6):3031–3045. doi:10.2135/cropsci2016.03.0182.
- Trachsel S, Sun D, SanVicente FM, Zheng H, Suarez EA, Babu R, Zhang X. 2016b. Correction: Identification of QTL for early vigor and stay-green conferring tolerance to drought in two connected advanced backcross populations in tropical maize (*Zea mays* L.). *PLoS One.* 11(9):e0163400. eng. doi:10.1371/journal.pone.0163400.
- Warburton ML, Reif JC, Frisch M, Bohn M, Bedoya C, Xia XC, Crossa J, Franco J, Hoisington D, Pixley K, et al. 2008. Genetic diversity in CIMMYT nontemperate maize germplasm: Landraces, open pollinated varieties, and inbred lines. *Crop Sci.* 48(2):617–624. doi:10.2135/cropsci2007.02.0103.
- Zaman-Allah M, Zaidi PH, Trachsel S, Cairns JE, Vinayan MT, Seetharam K. 2016. Phenotyping for abiotic stress tolerance in maize: drought stress. A field manual. India: CIMMYT.
- Ziyomo C, Bernardo R. 2013. Drought Tolerance in Maize: Indirect selection through secondary traits versus genome wide selection. *Crop Sci.* 53(4):1269–1275. doi:10.2135/cropsci2012.11.0651.

Recibido octubre 6, 2021; aceptado noviembre 10, 2021.

Cómo citar: Gómez-Cerna MJ, Colbert RW, Rodríguez IY, Rosas-Sotomayor. 2021. Comportamiento agronómico de accesiones de maíz de Honduras bajo estrés de sequía. Ceiba. Zamorano Investiga: 36-51.