



IMPACTOS DEL AMBIENTE Y RIEGO RESTRINGIDO EN EL RENDIMIENTO DE GRANO DE TRIGO EN GUANAJUATO, MÉXICO

ENVIRONMENT AND LIMITED IRRIGATION IMPACTS ON WHEAT GRAIN YIELD IN GUANAJUATO, MEXICO

Juan Francisco Buenrostro-Rodríguez¹, Jorge Covarrubias-Prieto¹, Ernesto Solís-Moya², Lourdes Ledesma-Ramírez¹, Francisco Cervantes-Ortiz¹, Andrés Mandujano-Bueno², Juan Carlos Raya-Pérez¹ y Alfredo Josué Gámez-Vázquez^{2*}

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Guanajuato, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia (gamez.josue@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La producción de trigo en México enfrenta una escasez de agua para riego, por lo que es necesaria la generación de germoplasma con menor necesidad hídrica, y evaluar nuevo germoplasma de trigo con mayor tolerancia a déficit hídrico. El objetivo de esta investigación fue evaluar la productividad de seis genotipos de trigo bajo dos calendarios de riego, durante tres ciclos de otoño-invierno (2013 a 2016). Se observó que los ciclos de evaluación tuvieron mayor impacto sobre la expresión de los días a madurez, número de espigas m⁻², peso de mil granos, días a floración, granos m⁻², número de granos por espiga y rendimiento unitario de grano. Del total de la variabilidad generada por los factores de estudio y sus interacciones, la del rendimiento fue explicada principalmente por los ciclos de evaluación, riegos, genotipos, así como por las interacciones ciclos × riegos, genotipos × ciclos y genotipos × riegos. Con cuatro riegos, los genotipos presentaron mayor número de días a madurez, así como una mayor cantidad de biomasa, mayor número de granos por espiga, mayor cantidad de espigas m⁻² y mayor número de granos m⁻²; ésto permitió obtener 840 kg ha⁻¹ más de grano con respecto a tres riegos. La variedad Bárcenas S2002 sobresalió en riego restringido al presentar menor número de días a floración y madurez del grano, y obtuvo el mayor rendimiento, mayor producción de biomasa, número de espigas por m², número de granos por m² y peso de mil granos.

Palabras clave: Calendario de riegos, estrés hídrico, interacción genotipo-ambiente.

SUMMARY

Wheat production in Mexico faces a shortage of water for irrigation; therefore, it is necessary to generate germplasm with less water need and evaluate new wheat germplasm with greater tolerance to water deficit. The objective of this research was to evaluate the productivity of six wheat genotypes under two irrigation schedules, during three Autumn-Winter cycles (2013 to 2016). It was observed that the evaluation cycles had a greater impact on the expression of days to maturity, number of spikes m⁻², weight of a thousand grains, days to flowering, grains m⁻² and number of grains per ear and grain yield. Of the total variability generated by the study factors and their interactions, the yield variability was mainly explained by the evaluation cycles, irrigations, genotypes, as well as by the interactions cycles × irrigations, genotypes × cycles and genotypes × irrigations. With four irrigations, the genotypes presented a larger number of days to maturity, as well as a greater amount of biomass, a greater number of grains per spike, a greater number of

spikes m⁻² and higher number of grains m⁻²; this allowed obtaining 840 kg ha⁻¹ more of grain compared to three irrigations. The Bárcenas S2002 variety was outstanding under restricted irrigation by presenting fewer days to flowering and grain maturity, and obtained the highest yield, the highest biomass production, number of ears per m², number of grains per m² and weight of one thousand grains.

Index words: Genotype-environment interaction, irrigation schedule, water stress.

INTRODUCCIÓN

En 2020, México ocupó el quinto lugar como productor de trigo (*Triticum* spp.) en el continente americano, al producir 2'986,689 t (FAO, 2021); la superficie sembrada de este cultivo en condiciones de riego en los últimos cuatro años ha sido en promedio 495,876 ha, de las cuales se ha obtenido una producción de 3'004,038 t, con un valor económico de \$12'502,401 miles de MXN (SIAP, 2022). En el mismo periodo, Guanajuato aportó el 11.8 % de la producción nacional.

Una de las problemáticas en la producción de trigo en El Bajío es la escasez de agua. En esta región, el balance hidráulico subterráneo presenta un déficit de 1,041 millones de m³, debido a una alarmante sobreexplotación del acuífero; en Guanajuato existen 15,297 pozos activos, de los cuales, el 84 % se emplean en el sector agrícola. Los intervalos de profundidad de extracción son de 10 a 160 m en el Suroeste, de 2 a 233 m en el Sureste; en el Noroeste va de 16 a 270 m y en el Noreste de 35 a 192 m (CNA, 2016), lo cual ocasionó un abatimiento de 4.9 m en el acuífero de la cuenca alta del río Laja (Pérez-Vega *et al.*, 2020).

El estudio del estrés hídrico en plantas es una línea de investigación importante durante el fitomejoramiento (Somerville y Dangl, 2000), ya que es uno de los principales

factores que limitan la producción de los cultivos (Chandler y Bartels, 2003). El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) han generado líneas avanzadas para áreas de riego y temporal a partir de cruza entre trigos de invierno, primavera y especies silvestres, que se han evaluado en diferentes altitudes y latitudes bajo riego restringido, así como en áreas de temporal (Huerta-Espino *et al.*, 2011). Dentro de la selección de genotipos se han incorporado criterios de selección relacionados con la tolerancia al déficit hídrico (Lopes *et al.*, 2012; Reynolds *et al.*, 2012).

El rendimiento de grano depende del número de espigas por unidad de superficie, del número de granos por espiga y del peso individual de grano, donde un incremento en cualquiera de los tres componentes favorecerá un aumento del rendimiento, siempre y cuando no exista una disminución en los otros dos componentes (Ataei, 2006). Okuyama *et al.* (2005) encontraron que la altura de planta, el diámetro del tallo y especialmente la longitud de la espiga, son caracteres relacionados con el rendimiento de grano, por lo que la etapa reproductiva es sin duda, la más importante en términos de generación de componentes del rendimiento, debido a que durante ésta se define el número de espigas m^{-2} y el número de granos por espiga, componentes centrales del número de granos m^{-2} (Slafer *et al.*, 2003); esta última variable es la que presenta mayores posibilidades de mejoramiento; si se incrementa el número de óvulos y su fertilidad en las espigas (carácter multi-ovarios), se expresaría en un mayor número de granos por espiga y granos m^{-2} (Reynolds *et al.*, 2005). McDonald *et al.* (2008) observaron una relación positiva entre el número de granos m^{-2} y el rendimiento de grano en trigo en un estudio realizado en 13 ambientes de secano con diferentes niveles de estrés hídrico en Australia, México y Paquistán, confirmando la factibilidad de utilizar al número de granos m^{-2} como un carácter práctico para la selección de nuevas variedades con mayor rendimiento de grano. Por su parte, Moreno-Ramos *et al.* (2010) mencionaron que es factible obtener rendimientos adecuados con sólo tres riegos, en lugar de los cuatro que actualmente se aplican en la región del Noroeste de México.

La mayor parte de los programas de fitomejoramiento intentan generar variedades estables en su rendimiento y con interacción genotipo-ambiente favorable, que permita un rendimiento adecuado, lo que facilitaría el proceso de selección de nuevos genotipos (Yan y Holland, 2010). El objetivo de esta investigación fue identificar genotipos y caracteres agronómicos sobresalientes que influyen en el rendimiento y sus componentes, así como caracterizar la interacción genotipo-ambiente de genotipos con riego

restringido (tres riegos) en contraste con las condiciones actuales de producción (cuatro riegos).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Los experimentos se establecieron en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado a los 20° 35' 17.43" LN, 100° 49' 74.96" LO, a una altitud de 1725 msnm. Se evaluaron tres ciclos de cultivo: otoño-invierno 2013-14, 2014-15 y 2015-16.

Se presentaron diferencias en las condiciones ambientales en temperatura y precipitación durante los ciclos de evaluación. La precipitación acumulada registró 3 y 6.8 mm en 2013/2014 y 2014/2015, respectivamente y en el ciclo 2015/2016 no se registraron precipitaciones (Figura 1).

Manejo de los experimentos

Las siembras se realizaron el 18 de diciembre de 2013, 22 de diciembre de 2014 y 23 de diciembre de 2015, consideradas dentro del intervalo óptimo (Solís *et al.*, 2013) para los respectivos ciclos. Se empleó una densidad de siembra de 120 kg de semilla por hectárea; la dosis de fertilización fue 240-60-00. Se aplicó la mitad del nitrógeno y todo el fósforo en la siembra y el resto del nitrógeno a los 45 días y antes del primer riego de auxilio.

Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron seis genotipos, de los cuales, dos son variedades comerciales (testigos) y cuatro líneas experimentales (Cuadro 1). Se evaluaron además dos calendarios de riego: a los 0-45-75-100 y 0-45-75 días después de la siembra, con 12 cm de lámina de riego a la siembra y 10 cm en los siguientes, aplicados con riego rodado. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas y cuatro repeticiones por ambiente; en la parcela grande se estableció el calendario de riegos y en la parcela chica los genotipos. La unidad experimental constó de dos surcos de 3 m de longitud con una distancia entre ellos de 75 cm.

Variables evaluadas

En la cosecha se trillaron los primeros 2 m de longitud en cada unidad experimental; se midió el rendimiento de grano (RG) en $kg\ ha^{-1}$. Las plantas del metro restante se cortaron a ras del suelo y de ahí se seleccionaron 100 tallos al azar, para estimar los componentes de rendimiento, con

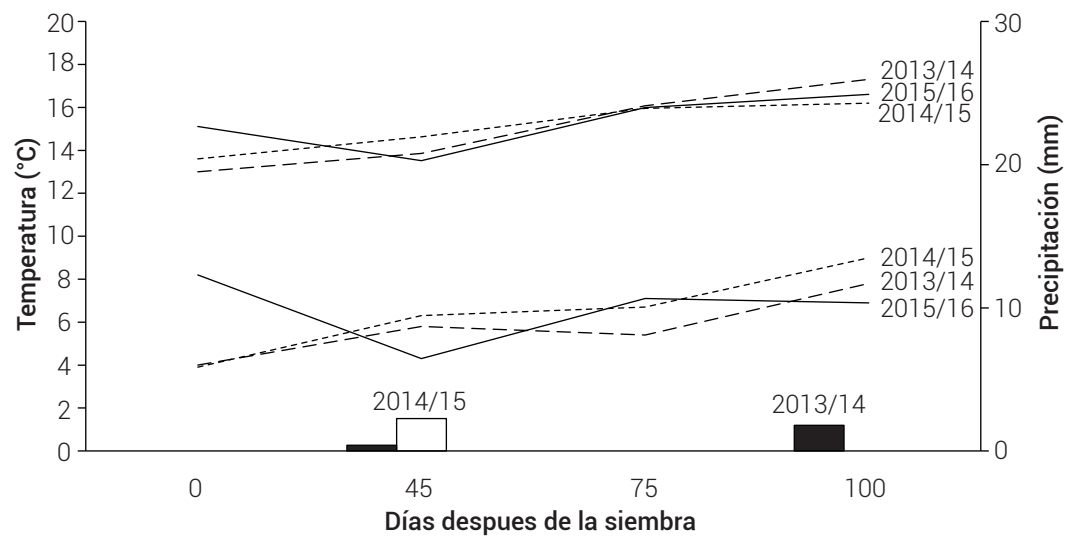


Figura 1. Temperaturas medias, mínimas (líneas) y precipitaciones (columnas) registradas en tres ciclos de evaluación de trigo, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

Cuadro 1. Genotipos de trigo evaluados durante los ciclos otoño invierno 2013-14, 2014-15 y 2015-16, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

No.	Genealogía	Estatus
1	Bárcenas S2002 (Bárcenas)	Variedad testigo
2	Kauz//altar84/aos/3/milan/kauz/4/huites/5/c80.1/3*b (Kauz)	Línea
3	IBIS//LOTH/GRACIA (Ibis)	Línea
4	Corocoro/3/pasa/ciria//ene (Corocoro)	Línea
5	Norteña F2007 (Norteña)	Variedad testigo
6	Cdoa/ee/celta/3/pata_2/6/aram_7//crex/all/5ente/mexi_2//hui (CDOA)	Línea

la metodología descrita por Pietragalla y Pask (2013). Los componentes evaluados fueron granos por m² (GPM2), espigas por m² (EPM2), granos por espiga (GPE), biomasa en t ha⁻¹ (BIO) y peso de mil granos en g (PMG). también se evaluaron los días a floración (DF) y días a madurez fisiológica (DM).

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza combinados a través de ciclos de cultivo y de componentes principales con el programa estadístico SAS versión 9.3 (SAS Institute, 2011). El análisis de la interacción genotipo × ambiente se realizó con el método SREG con el software GEA-R versión 4.1 (Pacheco *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

En el Cuadro 2 se muestra el análisis de varianza, en el que se observan diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre ciclos de cultivo para todas las variables evaluadas, lo cual es indicativo de la variación entre años, que es un factor de efectos aleatorios. En el número de riegos se obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en las variables RG, GPM2, GPE, PMG y BIO y con $P \leq 0.05$ en días a madurez (DM), lo que indica que la cantidad de agua disponible para el desarrollo del cultivo influye fuertemente en la manifestación de diferencias entre las variables evaluadas. Se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre genotipos para todas las variables, lo cual indica la existencia de variación genotípica para los atributos evaluados. Hubo diferencias altamente significativas ($P \leq$

0.01) en la interacción riegos \times ciclos para las variables RG, GPM2, GPE, PMG y BIO y significativas ($P \leq 0.05$) para EPM2; estos resultados ponen de manifiesto que el efecto de los regímenes de riego fue distinto a través de los ciclos de cultivo, lo que puede deberse a las diferencias en temperatura a través de los años, en el ciclo 2015/2016 se presentaron las temperaturas mínimas más bajas (4.3 °C) entre los 45 y 51 días después de la siembra (DDS); es decir, cuando se aplicó el segundo riego, en la etapa de encañe, lo que probablemente favoreció la expresión del mayor número de DF, EPM2, PMG, DM y RG; en el ciclo 2014/2015 entre amacollamiento y encañe se presentaron las mayores temperaturas medias y mínimas, lo cual probablemente pudo haber reducido los DF, DM y RG (127 DDS), coincidiendo con lo reportado por Castañeda-Saucedo *et al.* (2004) y Stapper y Fischer (1990).

Se presentaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) en la interacción genotipos \times ciclos en las variables RG, EPM2, GPE, BIO y DF, y significativos ($P \leq 0.05$) para GPM2 y DM, lo cual indica que la respuesta de los genotipos varió de manera diferencial entre los ciclos evaluados; es decir, mostraron diferente patrón de respuesta al cambiar las condiciones ambientales; también puede atribuirse al potencial genético de las variedades y a su ciclo de madurez. En la interacción genotipos \times número de riegos se detectaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) para RG y DF, y significativos ($P \leq 0.01$) en GPM2 y BIO, debido al ciclo de madurez de las variedades evaluadas, ya que se observaron variedades con buena respuesta con aplicación de tres riegos; es decir, que algunos genotipos presentaron plasticidad en su desarrollo al suministrarles menor cantidad de agua.

Del análisis de varianza generado por los tres factores de estudio y sus interacciones (Cuadro 2) se observó que los ciclos de evaluación contribuyeron en mayor proporción a la variación total detectada, ya que la variabilidad generada por este factor en la expresión de las variables DM, EPM2, PMG, RG y GPM2 superó a la originada por los genotipos y el número de riegos, probablemente por las temperaturas registradas. La variabilidad total del rendimiento fue debida al efecto de ciclos de cultivo (más del 50 %), seguida por la de genotipos, riegos, la interacción ciclos \times riegos, genotipos \times ciclos y genotipos \times riegos. En la expresión de la acumulación de biomasa, la variabilidad ambiental fue determinante, particularmente la debida a la interacción ciclos \times riegos, ciclos y riegos que superaron el 95 % de la variación total.

La variabilidad generada por el número de riegos superó a la de los genotipos en la expresión del PMG, GPM2, RG y GPE con 97.6, 80.4, 77.3 y 38 % respectivamente. Para la expresión de las variables DF, EPM2 y DM, la variabilidad

generada por los genotipos superó a la de los riegos. Entre las interacciones, las de mayor importancia estadística por su impacto en la expresión de la variabilidad de los caracteres evaluados fueron ciclos \times genotipos, la cual mostró efectos significativos en todas las variables evaluadas, con excepción del PMG y ciclos \times riegos que también impactó en la variación de todos los rasgos evaluados, con excepción de DF. Los coeficientes de variación de las variables evaluadas en el experimento se consideran aceptables (Gómez y Gómez, 1984). Las variables EPM2, BIO y GPE tuvieron menor precisión en su estimación, aunque sus coeficientes de variación son aceptables, debido probablemente a que fueron más afectadas por las variaciones ambientales entre parcelas.

Al comparar los ciclos de evaluación (Cuadro 3), el OI 2015/2016 presentó las mejores condiciones ambientales para la expresión de los genotipos, ya que se obtuvo en promedio el mayor rendimiento de grano, como resultado de periodo reproductivo y ciclo de cultivo más prolongados; es decir, se manifestó en un mayor número de días a floración y madurez fisiológica del grano, por lo que también se logró una mayor expresión de los componentes de rendimiento EPM, GPM2 y PMG. En el ciclo OI 2014/2015 se obtuvo significativamente menor rendimiento de grano ($P \leq 0.05$), probablemente debido a mayores temperaturas, aunque en éste también se obtuvo el mayor número de GPM2, GPE y biomasa, probablemente las mayores temperaturas durante el período de llenado de grano redujeron los DF, DM pero especialmente el PMG, mismos que redujeron drásticamente el rendimiento. Al analizar el rendimiento con respecto al resto de las variables, es posible observar que éste estuvo influenciado principalmente por las bajas temperaturas; a medida en que se extendió el ciclo, el rendimiento se incrementó y entre los componentes del rendimiento se encuentran principalmente el número de EPM2 y el número de GPM2, lo que coincide con lo reportado por Ataei (2006) y McDonald *et al.* (2008).

De la comparación del número de riegos (4 y 3) y con base en la lámina de 8 cm de diferencia entre ambos calendarios, se observa en general que la mayor disponibilidad de agua permitió a los genotipos un mayor número de DM del grano (1.5 días), así como la acumulación de casi el doble de biomasa, 9 % más de GPE y 15 % más de GPM2, lo que permitió, en promedio, elevar el rendimiento de grano en 840 kg ha⁻¹ con un riego adicional, mientras que la aplicación de un cuarto riego no influyó significativamente, en promedio, en el número de DF, ni en EPM2. Con tres riegos se obtuvo mayor PMG, pero menor número de GPE y GPM2, lo que dio lugar a un menor rendimiento.

Las variedades Bárcenas, Kauz e Ibiza sobresalieron con rendimientos superiores a las 6 t ha⁻¹, gracias a

Cuadro 2. Sumas de cuadrados y significancia estadística de los caracteres evaluados en seis genotipos de trigo con dos calendarios de riego durante los ciclos otoño-invierno 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 en el Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

FV	GL	Rendimiento		Granos por m ²		Espigas por m ²		Granos por espiga		Peso mil granos		Biomasa		Floración		Madurez	
Ciclos (C)	2	133.32	**	369,830,218.6	**	562,337.0	**	810.6	**	35,052.8	**	5668.3	**	3777.0	**	4060.5	**
Rep/Ciclos	9	3.33		9,705,759.4		55,706.0		229.4		42.3		77.5		31.5		46.0	
Riegos (R)	1	25.38	**	93,083,743.2	**	82,288.5		329.7	**	3449.6	**	4804.9	**	1.5		90.2	*
C × R	2	11.5	**	32,916,791.0	**	30,523.1	*	573.3	**	4767.2	**	5869.7	**	11.2		88.0	
Rep/C × R	9	1.6		8,435,788.6		21,292.9		140.5		63.0		49.9		38.7		148.0	
Genotipos (G)	5	28.5	**	91,111,470.6	**	196,016.7	**	1021.9	**	412.0	**	97.8	**	4891.0	**	504.4	**
C × G	10	10.6	**	24,951,614.2	*	105,147.4	**	530.3	**	95.0		143.9	**	177.0	**	112.0	*
G × R	5	5.2	**	16,474,087.5	*	14,526.8		80.7		50.0		55.6	*	84.5	**	33.3	
C × G × R	10	4.1	*	8,078,187.2		30,667.8		349.0		242.0	**	78.2		73.0		40.3	
Error residual	90	18.0		101,908,776.6		225,105.3		1705.7		466.1		423.6		437.6		466.4	
CV (%) (C)		9.3		9.4		22.5		15.4		4.4		15.9		2.3		1.7	
CV (%) (R)		5.4		8.7		13.9		12.1		5.4		12.7		2.5		3.1	

*, **: diferencias estadísticas al nivel 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente; FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación.

Cuadro 3. Prueba de medias para ciclos y riegos en caracteres evaluados en seis genotipos de trigo, ciclos otoño-invierno 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

Fuente de Variación	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Granos por m ²	Espigas por m ²	Granos por espiga	Peso mil granos (g)	Biomasa (t ha ⁻¹)	Floración (días)	Madurez (días)
Ciclos/DMS	0.2	551.7	27.7	2.2	1.5	1.3	1.1	2.3
2015/2016	7.2 a	11,976.5 a	420.7 a	29.5 b	60.3 a	17.1 b	89.9 a	139.8 a
2014/2015	5.0 c	12,416.6 a	359.6 b	35.2 a	27.2 b	26.6 a	78.6 b	127.3 c
2013/2014	5.3 b	8818.4 b	268.6 c	33.1 a	60.3 a	11.4 c	79.4 b	130.4 b
Riegos/DMS	0.1	365.0	18.3	1.4	1.0	0.8	0.7	1.5
4	6.2 a	11,874.5 a	357.2 a	34.1 a	44.4 b	24.1 a	82.7 a	133.3 a
3	5.4 b	10,266.5 b	342.1 a	31.1 b	54.2 a	12.6 b	82.5 a	131.7 b

Medias con la misma letra en las columnas dentro de cada factor de variación son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

un mayor número de granos por metro cuadrado. Los genotipos Norteña, CDOA y Corocoro fueron los de menor rendimiento dentro de todo el experimento (Cuadro 4); los tres fueron inferiores en granos m⁻², mientras que Corocoro y CDOA fueron inferiores en EPM2 y biomasa (Cuadros 4 y 5), Corocoro y Norteña fueron inferiores en GPE. Norteña y CDOA se comportaron inferiores en PMG; estos resultados son similares a los reportados por Martín *et al.* (2011) sobre el efecto de los componentes de rendimiento y la productividad de los genotipos, al concluir que el número de EPM2 y GPE son componentes centrales de granos m⁻². Al respecto, Espitia *et al.* (2021) concluyeron que el número de granos y de espigas por m² determinan el rendimiento del cultivo. Por otra parte, estos resultados se contraponen con los obtenidos por Villaseñor *et al.* (2012), quienes evaluaron a la variedad Norteña F2007 en 64 ensayos bajo la modalidad de riego normal y riego limitado en las regiones del norte de México (Nuevo León, Tamaulipas, Chihuahua y Coahuila) y El Bajío (Guanajuato, Jalisco, Michoacán) y Oaxaca, y sus resultados muestran que el rendimiento promedio de Norteña F2007 fue superior a Bárcenas S2002, Kronstad F2004, Tacupeto F2002 y Júpare C2001 en 12.2, 8.0, 7.0 y 3.5 %, respectivamente; ahí, Norteña F2007 expresó buena respuesta al riego restringido, debido probablemente a su evaluación en una mayor gama de mega-ambientes a nivel nacional.

Análisis de componentes principales

Los primeros dos componentes principales explicaron el 81.5 % de la varianza total del estudio. Los vectores característicos del primer componente principal (CP1) determinaron que las variables de mayor importancia fueron el RG, GPM2, EPM2 y Biomasa; es decir, las variables más asociadas al rendimiento y sus componentes

numéricos, mientras que días a madurez y a floración lo fueron en el CP2; es decir, variables asociadas con la duración del ciclo del cultivo.

En la Figura 2 se presenta la dispersión de los genotipos; Bárcenas S2002, Kauz e Ibis se clasifican como los de mayor rendimiento, los cuales además presentaron la mayor cantidad de GPM2, EPM2, GPE y PMG, con algunas excepciones (Cuadro 4). Entre estos tres genotipos, Bárcenas S2002 fue la variedad de mayor rendimiento, precocidad (días a floración y madurez) y PMG, en comparación con Kauz. Otro grupo está conformado por Norteña F2007, Corocoro y CDOA, con los menores rendimientos, menor número de GPM2 y de EPM2. Entre estos genotipos, Corocoro fue más precoz y obtuvo menor rendimiento que Norteña F2007, pero superó a CDOA, que fue el genotipo más precoz y de menor rendimiento. Del análisis de ambos grupos destaca que los genotipos evaluados en riego restringido durante la fase de llenado de grano redujeron rendimiento a través de reducir el número de GPM2, número de EPM2 y el PMG (Cuadro 4).

Análisis de interacción genotipo × ambiente

Del total de la varianza obtenida en la expresión del rendimiento de los genotipos, 64.8 % se explicó con el CP1 y con el CP2 el 17.8 %, por lo que el modelo SREG explica el 82.6 % con los dos primeros componentes principales (Figura 3).

Los genotipos más sobresalientes por su rendimiento fueron Ibis y Bárcenas, este último obtuvo el rendimiento de grano más alto en todos los ambientes de evaluación, salvo en el ambiente con mayor potencial, cosechado en 2016 y con cuatro riegos, donde la línea experimental

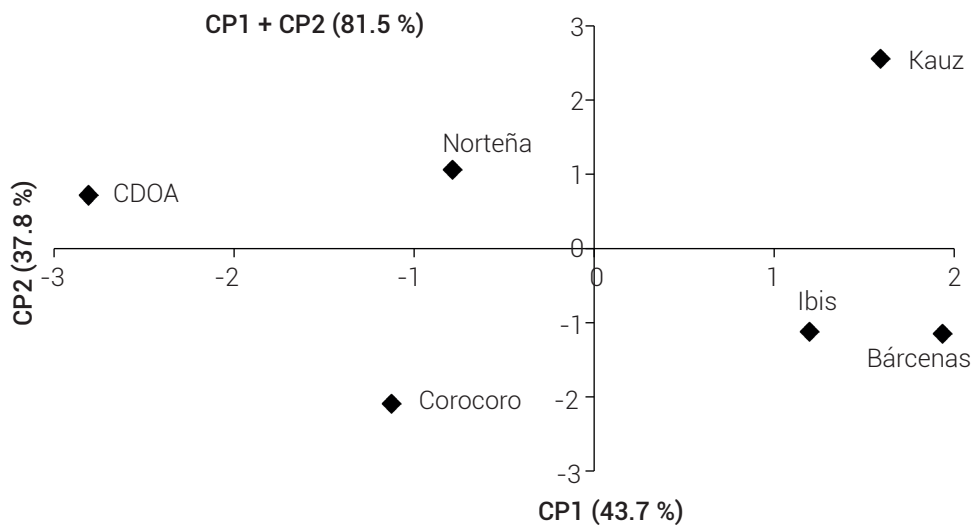


Figura 2. Dispersión de los seis genotipos de trigo evaluados en los ciclos otoño invierno 2013-14, 2014-15 y 2015-16, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

Cuadro 4. Prueba de medias de caracteres agronómicos evaluados en seis genotipos de trigo durante los ciclos otoño invierno 2013-2014, 2014-15 y 2015-2016, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

Genotipos	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Granos por m ²	Espigas por m ²	Granos por espiga	Peso mil granos (g)	Biomasa (t ha ⁻¹)	Floración (días)	Madurez (días)
Bárcenas	6.39 a	11,512 ab	369.1 a	31.5 bc	52.0 a	19.0 a	77.5 c	131.2 b
Kauz	6.27 a	12,304 a	376.5 a	34.2 ab	48.3 b	19.9 a	89.4 a	135.3 a
Ibis	6.24 a	11,544 ab	372.9 a	31.4 bc	50.4 a	18.1 ab	76.5 c	131.1 b
Corocoro	5.49 b	9932 c	316.6 b	31.6 bc	50.4 a	17.9 b	77.0 c	130.0 b
Norteña	5.43 b	10,714 bc	380.4 a	29.3 c	47.6 b	17.8 b	90.0 a	134.0 a
CDOA	5.34 b	10,413 c	282.7 b	37.7 a	47.4 b	17.5 b	85.7 b	133.6 a
Media	5.86	11,070.5	349.6	32.6	49.3	18.4	82.6	132.5
DMS	0.37	894.5	42.0	3.6	1.9	1.8	1.8	1.9
CV (%)	7.6	9.6	14.3	13.3	4.6	11.8	2.6	1.7

Medias con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05).

Ibis superó al resto de los genotipos evaluados. Los resultados son similares a los obtenidos por Solís, *et al.* (2003), quienes al comparar el rendimiento de diferentes variedades de gluten débil, observaron que Bárcenas superó en rendimiento con 12.0 % a Salamanca S75, con 9.2 % a Cortázar S94 y con 7.1 % a Saturno S86.

La línea experimental Ibis presentó un desarrollo sobresaliente específicamente en el ambiente donde la disponibilidad de humedad en el suelo no provocó ningún tipo de estrés sobre rendimiento de grano, seguido en importancia por Bárcenas S2002 y Kauz; por el contrario, Corocoro, Norteña F2007 y CDOA no sobresalieron por rendimiento en ninguno de los ambientes de evaluación.

CONCLUSIONES

Los ciclos de producción fueron el factor de variación de mayor importancia en la expresión de todas las variables, especialmente rendimiento y sus componentes, así como ciclo biológico, seguido en importancia por el efecto de los riegos, que tuvieron su mayor impacto en la expresión de la biomasa y los genotipos en la expresión de todas las variables. Por su efecto en el rendimiento, la interacción riegos × ciclo fue la de mayor importancia para la expresión de la mayoría de las variables evaluadas. La aplicación de cuatro riegos mejoró la producción de biomasa y el rendimiento, este último explicado con un mayor número de granos por espiga y por m² (13.5 %), en comparación

Cuadro 5. Vectores característicos de los componentes principales para las variables agronómicas de seis genotipos de trigo, ciclos otoño invierno 2013-14, 2014-15 y 2015-16, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

Variables	Vectores característicos	
	CP1	CP2
Rendimiento	0.510	-0.006
Granos m ⁻²	0.445	0.276
Espigas m ⁻²	0.437	0.121
Granos por espiga	-0.226	0.198
Peso de mil granos	0.317	-0.443
Biomasa	0.423	0.244
Floración	-0.129	0.534
Madurez fisiológica	-0.136	0.572
Valor característico	3.497	3.025
Porcentaje de varianza explicada	43.7	37.8

CP1: componente principal 1, CP 2: componente principal 2.

con la condición de tres riegos. Los genotipos Bárcenas S2002 y Kauz e Ibis sobresalieron por su rendimiento de grano y superaron a Corocoro, Norteña y CDOA. Bárcenas S2002 obtuvo los rendimientos de grano más altos en todos los ambientes de evaluación, con base en su mayor número de granos y espigas, biomasa y peso de mil granos, que ajustó al ser sometido a riego restringido. La línea Ibis superó a Bárcenas en las mismas variables en el ambiente de cuatro riegos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el apoyo otorgado para la beca de doctorado de Juan Francisco Buenrostro Rodríguez y al INIFAP por el financiamiento y facilidades otorgadas para establecer y culminar el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Ataei M. (2006) Path analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) yield. *Journal of Agricultural Sciences* 12:227-232.

Castañeda S. M. C., C. López C., J. Molina M., T. B. Colinas L. y A. Livera H. (2004). Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. *Revista Fitotecnica Mexicana* 27:167-175.

Chandler J. W. and D. Bartels (2003) Drought avoidance and drought adaptation. In: *Encyclopedia of Water Science*. B. A. Stewart and T. A. Howell (eds.). Marcel Dekker. New York, USA. pp:163-165.

CNA, Comisión Nacional del Agua (2016) Estadísticas del Agua en México.

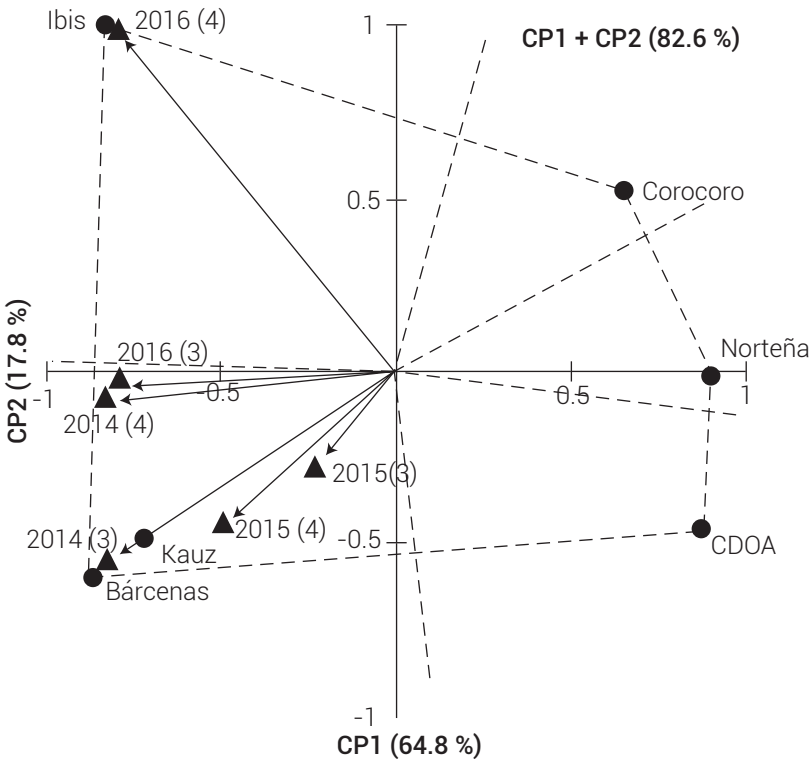


Figura 3. Análisis biplot de seis genotipos de trigo evaluados durante los ciclos otoño invierno 2013-14, 2014-15 y 2015-16, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

- Edición 2016. Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua, Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. 275 p.
- Espitia R. E., E. Martínez C., H. E. Villaseñor M., R. Hortelano S., A. Limón O. y A. Lozano G. (2021) Variabilidad genética y criterios de selección del rendimiento y los componentes en trigos harineros de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12:305-315, <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2787>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2021) FAOSTAT. Datos sobre alimentación y agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Marzo 2021).
- Gomez K. A. and A. A. Gomez (1984) *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd. edition. John Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, USA. 680 p.
- Huerta-Espino J., H. E. Villaseñor-Mir, E. Espitia-Rangel, E. Solís-Moya and M. van Ginkel (2011) The history of wheat breeding in Mexico. In: *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding*. Vol. 2. A. P. Bonjean, W. J. Angus and M. van Ginkel (eds.). Lavoisier Publishing. Paris, France. pp:275-307.
- Lopes M. S., M. P. Reynolds, M. R. Jalal-Kamali, M. Moussa, Y. Feltaous, I. S. A. Tahir, ... and M. Baum (2012) The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research* 128:129-136, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.017>
- Martín G. O., S. N. Agüero, J. R. Toll Vera, M. G. Nicosia, M. M. Fernández y J. Lucas (2011) Componentes del rendimiento y productividad, de trigo cultivado en secano en la llanura subhúmeda-húmeda de Tucumán. In: *Avances en la Producción Vegetal y Animal del NOA*. 2009-2011. E. L. Ulla y J. A. Rodríguez R. (eds.). Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán. San Miguel de Tucumán, Argentina. pp:332-337.
- McDonald G. K., Y. Genc, B. Nurzhanuly, R. Trethowan, M. Reynolds, M. Yaqub Mujahid, ... and H. Wallwork (2008) Quantifying the value to grain yield of QTL for adaptation and tolerance to abiotic stress in bread wheat. In: *Proceedings of the 11th International Wheat Genetics Symposium*. August 24-29, Brisbane, Queensland, Australia. Vol. 3. R. Appels, R. Eastwood, E. Lagudah, P. Langridge, M. Mackay, L. McIntyre and P. Sharp (eds.). Sydney University Press. Sydney, Australia. pp:934-936.
- Moreno-Ramos O. H., J. Rodríguez-Casas, E. P. Canseco-Vichis, E. C. Martín, H. Herrera-Andrade y A. Turrent F. (2010) Época de aplicación del primer riego y densidad de plantas en el cultivo de trigo. *Biotechnia* 12:32-41, <https://doi.org/10.18633/bt.v12i3.102>
- Okuyama L. A., L. C. Federizzi and J. F. B. Neto (2005) Plant traits to complement selection based on yield components in wheat. *Ciencia Rural* 35:1010-1018, <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500005>
- Pacheco Á., M. Vargas, G. Alvarado, F. Rodríguez, J. Crossa and J. Burgueño (2015) GEA-R (Genotype × Environment Analysis with R for Windows.) Version 4.1. CIMMYT Research Data & Software Repository Network, V16. CIMMYT, México, D. F. <https://data.cimmyt.org/dataset.xhtml?persistentId=hdl:11529/10203> (Noviembre 2021).
- Pérez-Vega A., H. H. Regil G. y J. F. Mas (2020) Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas* 103:e60150, <https://doi.org/10.14350/ig.60150>
- Pietragalla J. y A. Pask (2013) Rendimiento de grano y componentes del rendimiento. In: *Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo*. A. Pask, J. Pietragalla, D. M. Mullan, P. Chávez y M. Reynolds (eds.). CIMMYT. México, D. F. pp:95-103.
- Reynolds M. P., A. Pellegrineschi and B. Skovmand (2005) Sink-limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat. *Annals of Applied Biology* 146:39-49, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.03100.x>
- Reynolds M., Y. Manes y G. Rebetzke (2012) Aplicación de la fisiología en el fitomejoramiento para estrés por calor y sequía. In: *Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para Mejorar la Adaptación del Cultivo*. M. Reynolds, A. Pask, D. Mullan y P. Chávez (eds.). CIMMYT. México, D. F. pp:18-32.
- SAS Institute (2011) SAS/STAT Versión 9.3 User's Guide. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 8621 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Marzo, 2022).
- Slafer G. A., D. J. Miralles, R. Savin, E. M. Whitechurch y F. G. González (2003) Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. In: *Producción de Granos: Bases Funcionales para su Manejo*. E. H. Satorre, R. L. B. Arnold, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui y R. Savin (eds.). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp:100-132.
- Solís M. E., A. Salazar Z., J. Huerta E., A. Ramírez R., H. E. Villaseñor M. y E. Espitia R. (2003) Bárcenas S2002: nueva variedad de trigo harinero para El Bajío. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:73-74.
- Solís M. E., A. Ramírez R., L. Ledesma R. y M. L. Cruz G. (2013) Guía para la producción de trigo. In: *Guía para la Producción de Maíz, Frijol, Trigo y Sorgo en Guanajuato*. Libro Técnico No. 4. Campo Experimental Bajío, INIFAP. Celaya, Guanajuato, México. pp:114-138.
- Somerville C. and J. Dangi (2000) Plant biology in 2010. *Science* 290:2077-2078, <https://doi.org/10.1126/science.290.5499.2077>
- Stapper M. and R. A. Fischer (1990) Genotype, sowing date and plant spacing influence in high-yielding irrigated wheat in southern New South Wales. III. Potential yields and optimum flowering dates. *Crop & Pasture Science* 41:1043-1056, <https://doi.org/10.1071/AR9901043>
- Villaseñor M. H., J. Huerta E., E. Solís M., E. Espitia R., J. Ireta M. y R. Galván L. (2012) Norteña F2007, nueva variedad de trigo para siembras de riego en la región norte y El Bajío de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:207-212, <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1495>
- Yan W. and J. B. Holland (2010) A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171:355-369, <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0030-5>

