

Rendimiento de grano en trigo modificado por cambios en la fuente durante el llenado de grano*

Grain yield in wheat modified by source changes during grain filling

Cristobal Valdés Valdés¹, Gaspar Estrada Campuzano^{2§}, Carlos Gustavo Martínez Rueda² y Aurelio Domínguez López²

¹Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México. *Campus* Universitario “El Cerrillo”. Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 15. Toluca, México. AP. 35. CP. 50200. Tel. 722 2965518, ext. 142. ²Facultad de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma del Estado de México. *Campus* Universitario “El Cerrillo”. Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 15. Toluca, México. AP. 35. CP. 50200. Tel. 722 2965518, ext. 142. [§]Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx.

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la limitación de la fuente durante la etapa de llenado de grano (antesis a madurez fisiológica) sobre los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de trigo mediante defoliación y estrés hídrico. Los experimentos se llevaron a cabo en el ciclo verano-otoño 2013 (temporal; experimento 1) e invierno-primavera 2013-2014 (riego; experimento 2) en Toluca, México, a una densidad de 350 semillas m⁻² y una dosis de fertilización de 200-60-30 (N-P-K); en ambos experimentos los tratamientos para reducir la fuente fueron impuestos en antesis. En el experimento 1 se estudiaron 60 líneas elite (CIMCOG) y dos tratamientos de reducción de fuente (defoliado y sin defoliar), bajo un diseño de parcelas divididas con dos repeticiones. El experimento 2 consistió de 20 genotipos seleccionados del experimento 1 y sometidos a dos regímenes hídricos (riego y sequía) en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en donde cada régimen de agua se consideró un ambiente. Se realizaron análisis de varianza de acuerdo al modelo utilizado para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables respuesta. Los resultados mostraron que las condiciones de estrés (defoliación y sequía) afectaron significativamente el rendimiento de grano y sus componentes. Se observó una respuesta diferencial en el

Abstract

The objective of the present work was to evaluate the effect of source limitation during the grain filling stage (anthesis to physiological maturity) on the physiological and numerical components of wheat yield through defoliation and water stress. The experiments were carried out in the summer-autumn 2013 cycle (temporal; experiment 1) and winter-spring 2013-2014 (irrigation; experiment 2) in Toluca, Mexico, at a density of 350 seeds m⁻² and a dose of fertilization of 200-60-30 (NPK); in both experiments treatments to reduce the source were imposed on anthesis. In the experiment 1, 60 elite lines (CIMCOG) and two source reduction treatments (defoliated and without defoliation) were studied under a split plot design with two replicates. The experiment 2 consisted of 20 genotypes selected from experiment 1 and subjected to two water regimes (irrigation and drought) in a randomized complete block design with three replicates where each water regime was considered an environment. The analysis of variance was performed according to the model used to evaluate the effect of the treatments on the response variables. The results showed that the stress conditions (defoliation and drought) significantly affected grain yield and its components. A differential response was observed in the behavior of the genotypes

* Recibido: noviembre de 2016
Aceptado: enero de 2017

comportamiento de los genotipos en ambos experimentos. El rendimiento de grano fue menos afectado por defoliación y más drásticamente por sequía a través de reducciones en el número de granos y el peso individual de los mismos.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., defoliación, estrés hídrico, rendimiento de grano.

Introducción

Durante la segunda mitad del siglo XX el rendimiento de los cultivos se incrementó significativamente, no obstante, durante las últimas décadas ha disminuido (Brisson *et al.*, 2010; Fischer and Edmeades, 2010). Aunado a estas reducciones en las ganancias en rendimiento, los incrementos en la población traen consigo que la producción de alimentos por habitante también disminuya, lo cual conduce a la necesidad de lograr incrementos en el rendimiento del orden de 50% en el futuro cercano (Reynolds *et al.*, 2009).

Debido a lo anterior, es necesario estudiar la variabilidad en el rendimiento del mejor germoplasma, de tal forma que los mejoradores puedan contar con progenitores elite para incluir en nuevas cruces que permitan incrementar los rendimientos potenciales de trigo. En relación con esta necesidad, el año 2009 se crea el consorcio de rendimiento de trigo (WYC), por sus siglas en inglés, el cual agrupa un conjunto de expertos mundiales en trigo (fisiólogos, genetistas, agrónomos) y dentro de sus prioridades establece el estudio de germoplasma elite de trigo (Reynolds *et al.*, 2011). Ante esto se forma el CIMCOG (CIMMYT México Core Germoplasm) el cual integra a un conjunto de 60 genotipos de trigo que ha sobresalido por su buen comportamiento y adaptación agronómica en algunas regiones del mundo.

Durante muchos años el mejoramiento del rendimiento en trigo ha estado fuertemente asociado con incrementos en el número de granos por unidad de área (NG) e índice de cosecha (IC) (Shearman *et al.*, 2005), este último, considerado como la proporción de la biomasa total que representa el grano cosechado (Zhang *et al.*, 2012). Los incrementos en el IC fueron debidos a reducciones en la altura de planta, lo cual modificó la biomasa producida y por consiguiente su distribución hacia los órganos reproductivos incrementando el NG (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003; Shearman *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2007). A pesar de que ha habido incrementos sustanciales en el NG, muchas

in both experiments. The grain yield was less affected by defoliation and more drastically by drought through reductions in the number of grains and the individual weight of grains.

Keywords: *Triticum aestivum* L., defoliation, grain yield, water stress.

Introduction

During the second half of the 20th century crop yields increased significantly, however, during the last decades it has declined (Brisson *et al.*, 2010; Fischer and Edmeades, 2010). Coupled with these reductions in yield gains, increases in population mean that per capita food production also declines, which leads to the need for yield increases of around 50% in the near future (Reynolds *et al.*, 2009).

Due to the above, it is necessary to study the variability in yield of the best germplasm, so that the breeders can count on elite progenitors to include in new crosses that allow to increase the potential yields of wheat. In relation to this need, the wheat yield consortium (WYC) is created in 2009, which brings together a group of world experts in wheat (physiologists, geneticists, agronomists) and within its priorities establishes The study of elite wheat germplasm (Reynolds *et al.*, 2011). Before this the is formed CIMCOG (CIMMYT Mexico Core Germoplasm), which integrates a set of 60 wheat genotypes that has excelled due to its good behavior and agronomic adaptation in some regions of the world.

For many years the yield improvement in wheat has been strongly associated with increases in the number of grains per unit area (NG) and harvest index (IC) (Shearman *et al.*, 2005), the latter being considered as the proportion Of the total biomass that represents the harvested grain (Zhang *et al.*, 2012). The increases in the IC were due to reductions in plant height, which modified the biomass produced and consequently its distribution to the reproductive organs, increasing NG (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003; Shearman *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2007). Although there have been substantial increases in NG, many evidences in the literature mention that potential wheat yield is limited by a small NG (demand), mainly in modern varieties (Miralles and Slafer, 2007; Zhang *et al.*, 2010). The above would indicate that

evidencias en la literatura mencionan que el rendimiento potencial de trigo está limitado por un NG (demanda) aun pequeño, en las variedades modernas (Miralles and Slafer, 2007; Zhang *et al.*, 2010). Lo anterior, estaría indicando que aún existe potencial para incrementar el rendimiento de trigo aumentando la demanda y así incrementar el IC sin modificaciones sustanciales en la biomasa total.

En la actualidad existen estudios que identifican líneas de trigo elite que podrían contribuir a incrementar el rendimiento de trigo, identificando características agronómicas y fisiológicas para ser incluidas en los programas de mejoramiento genético (Reynolds *et al.*, 2015). En este sentido, estudiar la variabilidad genotípica en los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de cultivares elite sería de gran utilidad en programas de mejoramiento. No obstante, los cultivos son vulnerables a la variación ambiental, la cual puede considerarse como un obstáculo para mejorar el potencial de rendimiento en trigo (Reynolds *et al.*, 2004).

Uno de los componentes numéricos del rendimiento es el peso de grano (PG) el cual es definido durante el periodo comprendido entre floración y madurez fisiológica, y puede ser afectado tanto por estreses bióticos y abióticos (Estrada-Campuzano *et al.*, 2008). Durante muchos años se ha mencionado que el PG no está asociado a los cambios logrados en el rendimiento de grano (Shearman *et al.*, 2005; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007), sin embargo, se ha descubierto recientemente que algunas combinaciones en algunas líneas del germoplasma del CIMMYT combinan altos rendimientos con alto peso de grano (Sayre *et al.*, 1997; Rattey *et al.*, 2009).

Por lo anterior, evaluar el efecto de cambios en el ambiente sobre el NG y PG en líneas elite de trigo ayudaría a entender los mecanismos que están detrás de la distribución de asimilados desde las hojas y tallos hacia la espiga durante el periodo de llenado de grano. Con base a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la limitación de la fuente durante la etapa de llenado de grano (antes a madurez fisiológica) sobre los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de trigo mediante defoliación y estrés hídrico.

Materiales y métodos

Condiciones del experimento

there is still potential to increase wheat yield by increasing demand and thus increase IC without substantial changes in total biomass.

There are currently studies that identify elite wheat lines that could significantly contribute to increased wheat yield, identifying agronomic and physiological characteristics to be included in genetic breeding programs (Reynolds *et al.*, 2015). In this sense, studying the genotypic variability in the physiological and numerical components of the yield of elite cultivars could be very useful in breeding programs. Despite this, crops are vulnerable to environmental variation, which can be considered as an obstacle to improve yield potential in wheat (Reynolds *et al.*, 2004).

One of the numerical components of yield is the grain weight (PG) which is defined during the period between flowering and physiological maturity, and can be affected by both biotic and abiotic stresses (Estrada-Campuzano *et al.*, 2008). For many years it has been mentioned that PG is not associated with changes in grain yield (Shearman *et al.*, 2005; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007), however, it has been recently discovered that some combinations in some lines of CIMMYT germplasm combine high yields with high grain weight (Sayre *et al.*, 1997; Rattey *et al.*, 2009).

Therefore, evaluating the effect of changes in the environment on NG and PG in elite wheat lines would help to understand the mechanisms behind the distribution of assimilates from the leaves and stems to the spike during the period of grain filling. Based on the above, the objective of the present study was to evaluate the effect of source limitation during the grain filling stage (anthesis to physiological maturity) on the physiological and numerical components of wheat yield through defoliation and water stress.

Materials and methods

Experiment conditions

Two experiments were carried out in the experimental field of the Faculty of Agricultural Sciences of the Autonomous University of the State of Mexico (UAEM) located 18 km north of the city of Toluca (19° 15' 33" north latitude, 99° 39' 38" west longitude, height of 2 640 masl). The first experiment was focused to reduce the assimilation (source)

Dos experimentos se llevaron a cabo en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) localizada a 18 km al norte de la ciudad de Toluca (19° 15' 33" latitud norte, 99° 39' 38" longitud oeste, altura de 2 640 msnm). El primer experimento fue enfocado para reducir en el cultivo el aporte de asimilados (fuente) durante el llenado de grano mediante la eliminación de todas las hojas de la planta (defoliado) en la etapa de antesis, mientras que el segundo se sometió a estrés hídrico a partir de floración. Ambos experimentos se diseñaron para evaluar el efecto de la disminución de la fuente sobre los componentes numéricos del rendimiento del grano de trigo. El clima predominante en esta localidad es del tipo C (w2) (w) b (i), que de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), corresponde al templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5%), poca oscilación térmica, temperatura media anual de 12.8 °C y promedio anual de 900 mm.

Tratamientos

Los tratamientos consistieron en 60 líneas de trigo, el material élite pertenece al CIMMYT México Core Germplasm Panel (CIMCOG) con buena adaptación agronómica. La colección completa de los 60 genotipos del grupo CIMCOG son potencialmente útiles en la práctica de los programas de mejoramiento dirigidos a elevar más el potencial de rendimiento y por eso es el principal germoplasma estudiado hasta el momento por el consorcio de producción de trigo (Reynolds *et al.*, 2011).

Experimento 1. Se llevó a cabo durante el ciclo verano-otoño (V-O) del año 2013 (temporal), en donde se evaluaron 60 líneas de trigo y dos tratamientos de reducción de la fuente (D: defoliado y SD: sin defoliar), estos últimos fueron nombrados ambientes. Los tratamientos fueron distribuidos en un arreglo de parcelas divididas con dos repeticiones, en donde la parcela grande fue asignada a genotipos y la subparcela a los ambientes. Los genotipos fueron sembrados manualmente a una densidad de población de 350 semillas m⁻² en parcelas de dos surcos de 3 m de largo y 0.2 m de separación, sin limitación de nutrientes. En antesis (Z60) (Zadoks *et al.*, 1974), a lo largo de 1.5 m de longitud sobre las hileras de cada parcela las plantas fueron defoliadas en forma manual eliminando todas las hojas verdes presentes en cada tallo, el resto de la parcela permaneció intacta (plantas no defoliadas).

during the grain filling by eliminating all the leaves of the plant (defoliated) in the anthesis stage, while the second one underwent water stress from flowering. Both experiments were designed to evaluate the effect of source reduction on the numerical components of wheat grain yield. The predominant climate in this locality is type C (w2) (w) b (i), which according to Köppen's climatic classification, modified by García (1988), corresponds to the subhumid temperate, the humid subhumid, with rain in summer and low rainfall in winter (5%), little thermal oscillation, average annual temperature of 12.8 °C and annual average of 900 mm.

Treatments

The treatments consisted of 60 wheat lines, the elite material belongs to the CIMMYT Mexico Core Germplasm Panel (CIMCOG) with good agronomic adaptation. The complete collection of the 60 genotypes of the CIMCOG group are potentially useful in the practice of breeding programs aimed at raising yield potential further and is therefore the main germplasm studied so far by the wheat production consortium (Reynolds *et al.*, 2011).

Experiment 1. It was carried out during the summer-autumn (S-A) cycle of 2013 (temporary), where were evaluated 60 wheat lines and two source reduction treatments (D: defoliated and SD: without defoliation), the latter were named environments. The treatments were distributed in an arrangement of split plots with two replicates, where the large plot was assigned to genotypes and the subplot to the environments. The genotypes were manually seeded at a population density of 350 seeds m⁻² in plots of two rows 3 m long and 0.2 m apart without nutrient limitation. In anthesis (Z60) (Zadoks *et al.*, 1974), along 1.5 m of length on the rows of each plot the plants were manually defoliated eliminating all the green leaves present in each stem, the rest of the plot remained intact (non-defoliated plants).

Experiment 2. It was conducted during the winter-spring (W-S) season 2013-2014, treatments consisted of the factorial combination of 20 wheat lines (which were selected from experiment 1 because they showed a higher number of ears per m² and similar cycle to anthesis) and two treatments of water availability (R: irrigation throughout the cycle and S: irrigation until anthesis and drought during grain filling). In each treatment of water availability, the genotypes were distributed in a randomized complete block design with three replicates, where each water availability was considered a particular environment. The cultivars were manually planted

Experimento 2. Fue conducido durante la estación de crecimiento invierno-primavera (I-P) 2013-2014, los tratamientos consistieron de la combinación factorial de 20 líneas de trigo (fueron seleccionadas del experimento 1 por mostrar mayor número de espigas por m^2 y similar ciclo a antesis) y dos tratamientos de disponibilidad de agua (R: riego todo el ciclo y S: riego hasta antesis y sequía durante el llenado de grano). En cada tratamiento de disponibilidad de agua, los genotipos fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en donde cada disponibilidad de agua se consideró un ambiente en particular. Los cultivares se sembraron en forma manual a una densidad de 350 semillas m^{-2} en parcelas de seis surcos de 3 m de largo y 0.2 m de separación, sin limitación de nutrientes. Para evitar el flujo de humedad desde el tratamiento de riego hacia el tratamiento sequía, se sembraron seis hileras de trigo (surcos trampa) entre ambos tratamientos de disponibilidad de agua.

Los experimentos de ambas estaciones de crecimiento se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades. La fertilización consistió de la fórmula 200-60-30, fraccionando el nitrógeno en tres momentos durante el ciclo del cultivo (siembra, espiguilla terminal y hoja bandera expandida). Se utilizaron como fuentes de N, P y K a urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente.

Variables evaluadas

Biomasa aérea. En la etapa de madurez fisiológica (Z89) (Zadoks *et al.*, 1974) se extrajeron las plantas de los dos surcos de 1 m de cada parcela. El peso seco de hojas, tallos y espigas se registró después de secar las muestras en una estufa de aire forzado durante 72 h a 70 °C, hasta alcanzar peso constante.

Rendimiento de grano y sus componentes. Una vez determinado el peso seco de las espigas obtenidas en madurez fisiológica se procedió a separar el grano de vástagos principales y macollos, con lo cual se determinó el rendimiento de grano por unidad de superficie (RG), número de granos (NG), peso individual de grano (PIG), número de granos por espiga (NGE), número de espigas por m^2 (NE) e índice de cosecha (IC).

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza de acuerdo a los modelos escritos anteriormente (Littell *et al.*, 1996) para evaluar el efecto de los tratamientos (ambientes) sobre cada una de

at a density of 350 seeds m^{-2} in plots of six rows 3 m long and 0.2 m apart without nutrient limitation. To avoid moisture flow from the irrigation treatment to the drought treatment, six rows of wheat (trap furrows) were planted between both treatments of water availability.

The experiments at both growing seasons were kept free of weeds, pests and diseases. The fertilization consisted of the formula 200-60-30, fractionating the nitrogen in three moments during the crop cycle (planting, terminal spikelet and expanded leaf banner). The N, P and K sources were used as urea, triple calcium superphosphate and potassium chloride, respectively.

Variables evaluated

Aerial biomass. In the physiological maturity stage (Z89) (Zadoks *et al.*, 1974) the plants were extracted from the two rows and 1 m of each plot. The dry weight of leaves, stems and spikes was recorded after drying the samples in a forced air oven for 72 h at 70 °C, until constant weight was reached.

Yield of grain and its components. After determining the dry weight of the spikes obtained in physiological maturity, the grain was separated from main shoots and tillers, which determined the grain yield per unit area (RG), number of grains (NG), weight (PIG), number of grains per spike (NGE), number of ears per m^2 (NE) and harvest index (IC).

Statistical analysis

Analysis of variance was performed according to previously written models (Littell *et al.*, 1996) to evaluate the effect of treatments (environments) on each of the variables studied. When analyzes of variance revealed significant differences, the mean values for each treatment were compared using the Tukey test (DMSH) at a significance level of 5% (Palaniswamy and Palaniswamy, 2006) using SAS software (SAS Institute, 2002). The simple linear regression analysis was performed to measure the degree of relationship that might exist between two variables.

Results and discussion

The analysis of variance showed significant effects of treatments on the variables evaluated in both experiments (Table 1). In this sense, the effect of repetitions was only significant in biomass at physiological maturity (BioMF),

las variables estudiadas. Cuando los análisis de varianza revelaron diferencias significativas, los valores medios para cada tratamiento fueron comparados usando la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) de la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 5% (Palaniswamy and Palaniswamy, 2006) utilizando el software SAS (SAS Institute, 2002). Se realizaron análisis de regresión lineal simple para mediar el grado de relación que pudiera existir entre dos variables.

Resultados y discusión

Los análisis de varianza mostraron efectos significativos de los tratamientos sobre las variables evaluadas en ambos experimentos (Cuadro 1). En este sentido, se aprecia que el efecto de las repeticiones solo fue significativo en biomasa a madurez fisiológica (BioMF), RG, NG y NE, y solo para el caso del experimento 1.

RG, NG and NE, and only for the case of experiment 1. The genotypic effect was highly significant for all variables studied in both experiments, while the environments evaluated (defoliation and drought) caused significant changes in the characters studied. In the treatment of defoliation the variables BioMF, RG, NGPE and IC were significantly influenced by the genotype*environment interaction, which was manifested in a differential behavior of the genotypes in each of the environments studied.

The coefficients of variation fluctuated between 3.1 and 12.9% corresponding to the variables NE and NGPE, respectively. In experiment 2, the genotype*environment interaction was only significantly present in the NGPE. The coefficients of variation were less than 10% in most of the variables shown in the experiment (Table 1). When different genotypes are exposed to contrasting environmental conditions it is common to detect significant effects of cultivars, environments and their various interactions (Koutroubas *et al.*, 2012; González *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Valores de F y su significancia estadística para diferentes líneas de trigo evaluadas bajo condiciones ambientales contrastantes (defoliado y sequía) en Toluca, México.

Table 1. Values of F and their statistical significance for different wheat lines evaluated under contrasting environmental conditions (defoliation and drought) in Toluca, Mexico

Experimento	FV	gl	BioMF (g m ⁻²)	RG (g m ⁻²)	IC	NG	PIG (mg)	NE	NGPE
Experimento 1									
(defoliado)	Repetición	1	7.7*	8*	0 ns	6.9*	0 ns	23.8**	2.1 ns
	Genotipo (G)	59	7**	8**	3.7**	8.2**	5.2**	8.5*	7.7**
	Error (a)	59	9815	1969.7	0.002	1215180.1	12.6	1036.5	9.9
	Ambiente (A)	1	672.3**	336.3**	28.3**	16.1*	78.6**	6.4*	6.4*
	G x A	59	4.1**	1.7*	2.9**	1.3 ns	1.4ns	1.1 ns	2.5**
	Error (CM)	60	5401.4	874.7	0.001	1206017.1	14.7	110.2	15.4
	CV (%)		6.4	6.7	8.6	10.8	8.6	3.1	12.9
Experimento 2									
(sequía)	Repetición (Amb)	4	0.8 ns	1.3 ns	1 ns	1 ns	0.4 ns	1.8 ns	0.5 ns
	Ambiente (Amb)	1	76.5*	52.3*	10.4*	6.8*	166.4*	0.1 ns	19.6**
	Genotipo (G)	19	8.8**	8.2**	6.8**	6.8**	9.3**	16.2**	7.8**
	G x A	19	0.9 ns	0.9 ns	1.6 ns	0.7ns	1.1 ns	0.05 ns	2.2*
	Error (CM)	76	5905.6	1634.8	0.0008	1131667.8	5.4	232.1	7
	CV (%)		6.8	10	8.2	10	6.1	4.2	9.2

BioMF= producción de biomasa en madurez fisiológica; RG= rendimiento de grano; IC= índice de cosecha; NG= número de granos por m²; PIG= peso individual de grano; NE= número de espigas por m²; NGPE= número de granos por espigas; * = significativo ($p < 0.05$); ** = altamente significativo ($p < 0.01$); ns = no significativo ($p > 0.05$).

El efecto genotípico fue altamente significativo para todas las variables estudiadas en ambos experimentos, mientras que, los ambientes evaluados (defoliación y sequía) provocaron cambios significativos en los caracteres estudiados. En el tratamiento de defoliado las variables BioMF, RG, NGPE e IC fueron influenciadas de manera significativa por la interacción genotipo*ambiente, lo cual se vio manifestado en un comportamiento diferencial de los genotipos en cada uno de los ambientes estudiados.

Los coeficientes de variación obtenidos fluctuaron entre 3.1 y 12.9% correspondiendo a las variables NE y NGPE, respectivamente. En el experimento 2, la interacción genotipo*ambiente solo estuvo presente de manera significativa en el NGPE. Los coeficientes de variación fueron menores de 10% en la mayoría de las variables mostradas en el experimento (Cuadro 1). Cuando diferentes genotipos son expuestos a condiciones ambientales contrastantes es común detectar efectos significativos de cultivares, ambientes y sus diversas interacciones (Koutroubas *et al.*, 2012; González *et al.*, 2014). Los resultados revelaron efectos significativos de los distintos ambientes (defoliación y sequía) evaluados sobre los caracteres que determinan el rendimiento de grano, así también, el efecto genotípico fue responsable de cambios sustanciales en la variabilidad observada junto con la interacción genotipo*ambiente.

La defoliación afectó significativamente el rendimiento de grano a través de reducciones en la producción de biomasa, ya que el índice de cosecha se mantuvo constante en ambos ambientes (0.26 a 0.56); en este sentido, las reducciones en rendimiento fueron mejor explicadas por cambios en la biomasa a madurez fisiológica ($r^2=0.44$ $p<0.01$, Figura 1a) que por variaciones en el IC ($r^2=0.3$ $p<0.01$, Figura 1b). La defoliación redujo el rendimiento de grano 15% respecto al tratamiento sin defoliación y el efecto de este tipo de estreses dependió del cultivar, siendo el rango de rendimiento para las plantas defoliadas de 260.8 a 568.8 $g\ m^{-2}$, mientras que para el testigo (sin defoliar) se mantuvieron entre 338.1 y 608.4 $g\ m^{-2}$.

A pesar de que el IC presentó valores superiores a 0.5 en ambos tratamientos, no se reflejó en un mayor rendimiento de grano. Resultados similares fueron reportados por Bijanzadeh y Emam (2010), quienes al evaluar cinco cultivares de trigo: Shiraz, Bahar, Pishtaz y Sistan (trigo pan) y Yavaros (trigo durum), encontraron que la defoliación de todas las hojas disminuyó el rendimiento de grano y

The results revealed significant effects of the different environments (defoliation and drought) evaluated on the characteristics that determine grain yield, as well as the genotypic effect was responsible for substantial changes in the observed variability along with genotype*environment interaction.

The depletion significantly affected grain yield through reductions in biomass production, as the crop index remained constant in both environments (0.26 to 0.56); in this sense, reductions in yield were better explained by changes in biomass to physiological maturity ($r^2=0.44$ $p<0.01$, Figure 1a) than for changes in the IC ($r^2=0.3$ $p<0.01$, Figure 1b). The defoliation reduced grain yield by 15% compared to treatment without defoliation and the effect of this type of stress depended on the cultivar, with the yield range for the defoliated plants being 260.8 to 568.8 $g\ m^{-2}$, whereas for the control (without defoliation) were maintained between 338.1 and 608.4 $g\ m^{-2}$.

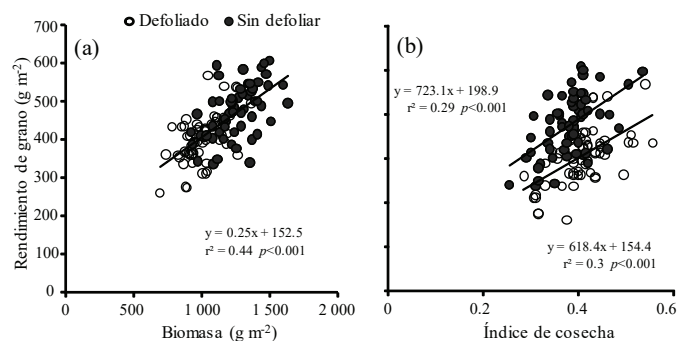


Figura 1. Relación entre el rendimiento de grano y biomasa a madurez fisiológica (a), e índice de cosecha (b). En 60 líneas de trigo cultivadas en dos tratamientos de manipulación de la fuente-demanda (defoliado y sin defoliar).

Figure 1. Relationship between grain yield and biomass at physiological maturity (a), and crop index (b). In 60 wheat lines grown in two treatments of manipulation of the source-demand (defoliado and without defoliar).

Although IC had values higher than 0.5 in both treatments, it was not reflected in a higher grain yield. Similar results were reported by Bijanzadeh and Emam (2010) who, when evaluating 5 wheat cultivars: Shiraz, Bahar, Pishtaz and Sistan (wheat bread) and Yavaros (durum wheat), found that defoliation of all leaves decreased yield grain and its components more drastically, compared to just leaving the flag sheet. They also observed that with the exception of Pishtaz, all cultivars significantly decreased grain yield

sus componentes más drásticamente, en comparación con solo dejar la hoja bandera. También observaron que a excepción de Pishtaz, todos los cultivares disminuyeron significativamente el rendimiento de grano del tallo principal por los tratamientos de defoliado; en tanto, en el cultivar Shiraz la defoliación de todas las hojas disminuyó el rendimiento de grano del tallo principal en 40.75% comparado con el control lo cual pudo demostrar que Shiraz fue sensible a la restricción de la fuente. Por su parte, Castañeda-Saucedo *et al.* (2009) al evaluar el efecto de las condiciones ambientales en el rendimiento de grano y calidad de semilla en cebada y trigo, observaron que el IC en trigo fue superior; sin embargo, no se relacionó con un mayor rendimiento.

Los componentes numéricos del rendimiento de grano mostraron una amplia variabilidad genotípica (Figura 2), los cuales se vieron afectados diferencialmente por los tratamientos de manipulación fuente-demanda. Los resultados sugieren que los cambios observados en el rendimiento de grano por efecto de los genotipos y ambientes fueron debidos a cambios en el NG más que al PIG. Bajo condiciones normales de crecimiento (sin defoliar) el número de granos varió desde 6 937 a 13 577 granos m^{-2} , mientras que el peso individual de grano estuvo entre los valores de 33.5 a 57.5 $mg\ grano^{-1}$.

La amplia variabilidad genotípica en el número de granos por unidad de superficie estuvo en línea con los cambios observados en el número de granos por espiga, el cual resulto ser el componente que explico mejor los cambios observados en el número de granos ($r^2=0.55\ p<0.001$) (Figura 3). La alteración en la relación fuente demanda (defoliado) afectó marginalmente los componentes del número de granos, tanto que los granos por espiga solo se afectaron un 5%, respecto al ambiente control. Las restricciones a las que fueron sometidos los cultivos redujeron en mayor proporción el NGPE, lo cual es coincidente con Bijanzadeh y Emam (2010) quienes al evaluar los cultivares de trigo Shiraz, Bahar, Pishtaz, Sistan y Yavaros, indicaron que el número de granos por espiga fue afectado significativamente por los tratamientos de defoliación de todas las hojas de la planta e inclusive al dejar sólo la hoja bandera; los cultivares Shiraz y Bahar tuvieron una reducción de 18.97 y 11.07%, Sistan fue el menos afectado (0.43 a 0.91%). En tanto, Chowdhary *et al.* (1999), reportaron que al remover todas las hojas en trigo de primavera causó una reducción de 17.17 y 13.27% para el número de granos por espiga y peso de 100 granos respectivamente.

of the main stem by defoliation treatments; in the Shiraz cultivar the defoliation of all the leaves decreased the grain yield of the main stem in 40.75% compared to the control which could demonstrate that Shiraz was sensitive to the restriction of the source. On the other hand, Castañeda-Saucedo *et al.* (2009) when evaluating the effect of environmental conditions on grain yield and seed quality on barley and wheat, observed that the IC in wheat was superior, however it was not related to a higher yield.

The numerical components of grain yield showed broad genotypic variability (Figure 2), which were differentially affected by source-demand manipulation treatments. The results suggest that the observed changes in grain yield by effect of genotypes and environments were due to changes in NG rather than to PIG. Under normal growth conditions (without defoliation) the number of grains varied from 6 937 to 13 577 grains m^{-2} , while the individual grain weight ranged from 33.5 to 57.5 $mg\ grain^{-1}$.

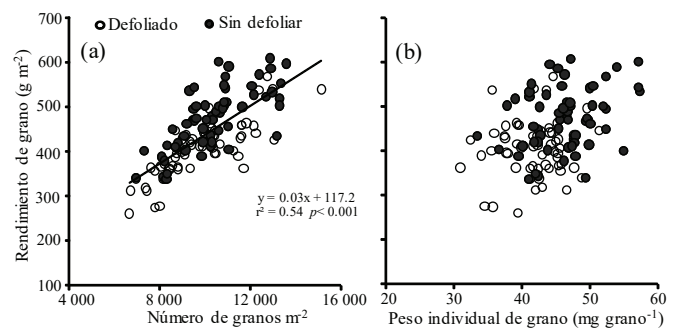


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de grano y el número de granos por m^2 (a) y peso individual de grano (b). En 60 líneas de trigo sometidas a condiciones de defoliado y sin defoliar.

Figure 2. Relationship between grain yield and number of grains per m^2 (a) and individual grain weight (b). In 60 wheat lines subjected to defoliation and non-defoliation conditions.

The wide genotype variability in the number of grains per unit area was in line with the observed changes in the number of grains per spike, which turned out to be the component that best explained the observed changes in the number of grains ($r^2=0.55\ p<0.001$) (Figure 3). The alteration in the source (defoliation) relation affected marginally the components of the number of grains, so that the grain per spike was only affected by 5%, compared to the control environment. The restrictions to which the crops were submitted reduced the NGPE, which is in agreement with Bijanzadeh and Emam

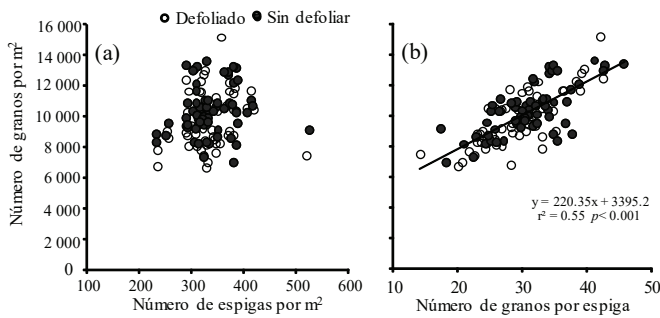


Figura 3. Relaciones entre el número de granos y número de espigas (a), número de granos y número de granos por espiga (b). En 60 líneas de trigo crecidos bajo condiciones de defoliado y sin defoliar.

Figure 3. Relationship between number of grains and number of grains (a), number of grains and number of grains per spike (b). In 60 wheat lines grown under conditions of defoliation and without defoliation.

Respuesta del rendimiento a estrés hídrico

Las condiciones de estrés generadas por déficit hídrico hicieron variar el rendimiento de grano para los distintos cultivares (Figura 4). El rendimiento de grano en plantas bajo condiciones de riego (testigo) osciló entre 348.5 a 542.9 g m⁻²; mientras que bajo condiciones de sequía fluctuaron entre de 239.4 y 457.4 g m⁻², lo cual representa una disminución de 13% por efecto del estrés. Por otro lado, el estrés de agua durante el llenado de grano afectó la producción de biomasa en 10% respecto al control y el IC solo fue afectado marginalmente (4%) (Figura 4). Cabe mencionar, que los cambios observados para rendimiento de grano por efecto de los tratamientos evaluados fueron explicados tanto por la producción de biomasa en madurez ($r^2=0.52$ $p<0.001$) como por el índice de cosecha ($r^2=0.51$ $p<0.001$).

Lo anterior coincide con Ortiz *et al.* (2003), quienes al estudiar los parámetros hídricos foliares en trigo y su uso en selección de genotipos resistentes a sequía, observaron que las condiciones de riego y el genotipo influyeron significativamente en la variación del rendimiento; el tratamiento de sequía provocó una disminución de 50% en rendimiento de grano respecto al control (riego) (3.609 y 6.917 kg ha⁻¹, respectivamente). La disminución del IC pudo atribuirse a la reducción del tamaño de la “demanda” en el tratamiento de sequía resultando en una menor proporción de asimilados, y en última instancia como recurso para ser retenido en los órganos vegetativos (Nicolas *et al.*, 1985).

(2010), who evaluated the cultivars Shiraz, Bahar, Pishtaz, Sistan and Yavaros, indicated that the number of grains by ear was significantly affected by the defoliation treatments of all the leaves of the plant and even leaving only the flag leaf; the cultivars Sharaz and Bahar had a reduction of 18.97 and 11.07%, sistan was the least affected (0.43 to 0.91%). Meanwhile, Chowdhary *et al.* (1999), reported that removing all leaves in spring wheat caused a reduction of 17.17 and 13.27% for the number of grains per spike and weight of 100 grains respectively.

Response of yield to water stress

The stress conditions generated by water deficit varied the yield of grain for the different cultivars (Figure 4). The yield of grain in plants under irrigation conditions (control) ranged from 348.5 to 542.9 g m⁻²; while under drought conditions they fluctuated between 239.4 and 457.4 g m⁻², representing a 13% decrease due to stress. On the other hand, water stress during grain filling affected biomass production in 10% with respect to control and IC was only affected marginally (4%) (Figure 4). It should be noted that the observed changes in grain yield due to the evaluated treatments were explained by the biomass production at maturity ($r^2=0.52$ $p<0.001$) and by the harvest index ($r^2=0.51$ $p<0.001$).

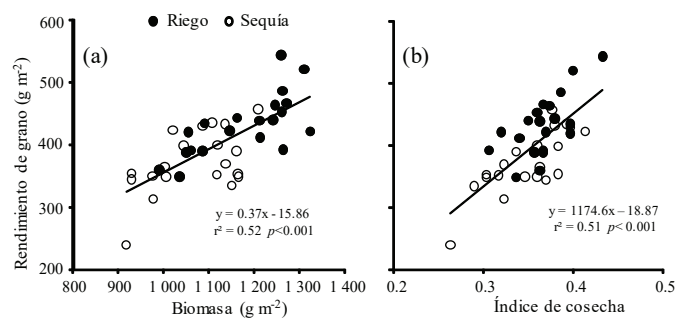


Figura 4. Relaciones entre el rendimiento de grano y biomasa a madurez fisiológica (a), e índice de cosecha (b). En 20 líneas de trigo cultivados bajo condiciones de riego y sequía.

Figure 4. Relationship between grain yield and biomass yield to physiological maturity (a), and crop index (b). In 20 wheat lines grown under irrigation and drought conditions.

This coincides with Ortiz *et al.* (2003), who, when studying leaf water parameters in wheat and their use in selection of drought-resistant genotypes, observed that irrigation

El peso individual de grano (PIG) fue afectado significativamente por el estrés de agua post-antesis, la respuesta observada al estrés hídrico fue similar (9% respecto al control) a la observada en plantas defoliadas (Figura 5). En este sentido, el PIG bajo condiciones de riego fue de 39.7 mg grano⁻¹, mientras que bajo condiciones de estrés hídrico fue de 36 mg grano⁻¹. Se pudo observar que no existió ninguna relación entre el rendimiento de grano y el PIG contrariamente las variaciones en el rendimiento se asociaron más positivamente con cambios en el NG (Figura 5).

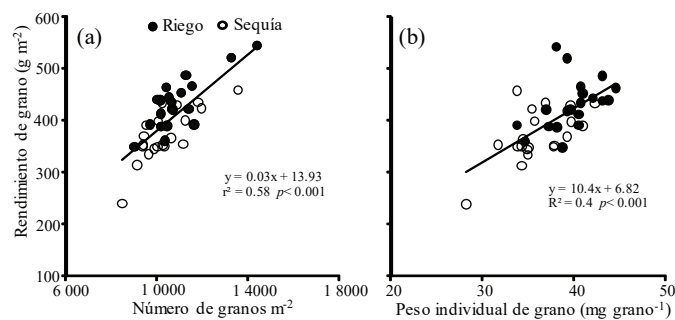


Figura 5. Relaciones entre el rendimiento de grano y el número de granos por m² (a) y el peso individual de grano (b). En 20 líneas de trigo crecidas bajo condiciones de riego y sequía.

Figure 5. Relationship between grain yield and number of grains per m² (a) and individual grain weight (b). In 20 wheat lines grown under irrigation and drought conditions.

A pesar de la poca afectación al NG estos explicaron grandemente los cambios observados en el rendimiento, lo cual coincide con Cossani *et al.* (2009) quienes mencionan que el rendimiento de grano para todos los tratamientos y especies fue principalmente determinado por el número de granos por unidad de área, incluso bajo las condiciones más estresantes de agua; asimismo, observaron que no existió relación entre peso y rendimiento de grano en trigo pan. Por su parte, Rajala *et al.* (2009) al estudiar distintos tratamientos de déficit hídrico en trigo de primavera detectaron que el número de granos por espiga y el peso individual del grano fue claramente afectado.

Como era de esperarse el número de granos por espiga solo fue afectado marginalmente por efecto del estrés hídrico post antesis, de tal forma que esta disminución solo representó 4% respecto del control. Así mismo, los cambios en el número de granos por unidad de superficie por efecto, tanto genotípico como del estrés de agua estuvieron asociados principalmente

conditions and genotype influenced significantly the variation in yield; the treatment of drought caused a 50% decrease in grain yield with respect to the control (irrigation) (3 609 and 6 917 kg ha⁻¹, respectively). The reduction of IC was attributed to the reduction of the size of the “demand” in the treatment of drought resulting in a lower proportion of assimilates, and ultimately as a resource to be retained in the vegetative organs (Nicolas *et al.*, 1985).

The individual grain weight (PIG) was significantly affected by post-anthesis water stress, the response observed to water stress was similar (9% to control) than that observed in defoliated plants (Figure 5). In this sense, the PIG under irrigation conditions was 39.7 mg grain⁻¹, while under water stress conditions it was 36 mg grain⁻¹. It was observed that there was no relationship between the grain yield and the PIG, contrary to the variations in yields were more positively associated with changes in NG (Figure 5).

In spite of the low affection to the NG, these explained greatly the changes observed in the yield, which coincides with Cossani *et al.* (2009) who mention that grain yield for all treatments and species was mainly determined by the number of grains per unit area, even under the most stressful conditions of water; Likewise, they observed that there was no relation between weight and grain yield in bread wheat. On the other hand, Rajala *et al.* (2009) when studying different treatments of water deficit in spring wheat detected that the number of grains per spike and the individual weight of the grain was clearly affected.

As expected, the number of grains per spike was only marginally affected by the effect of post-parasitic water stress, so that this decrease represented only 4% of the control. Also, changes in the number of grains per unit area per effect, both genotype and water stress were mainly associated with the change in the number of grains per spike (Figure 6). Our results showed no relationship between NG and NE, on the contrary there was a strong positive relationship between NG and NGPE. Similar results report that the number of grains per m² under drought conditions depended on 43% of spikes per m² and 56% of grains per spike (Ortiz *et al.*, 2003). However, Giunta *et al.* (1993), studying the effects of drought on yield and its durum wheat components in Mediterranean-type environments, reported that the main components affected were the number of fertile spikes per unit area and the number of grains per spike.

al cambio en el número de granos por espiga (Figura 6). Nuestros resultados no mostraron relación alguna entre NG y NE; por el contrario, existió una fuerte relación positiva entre NG y NGPE. Resultados similares reportan que el número de granos por m² bajo condiciones de sequía dependió en 43% de las espigas por m² y 56% de los granos por espiga (Ortíz *et al.*, 2003). Sin embargo, Giunta *et al.* (1993) al estudiar los efectos de la sequía sobre el rendimiento y sus componentes de trigo durum en ambientes de tipo mediterráneo, reportaron que los componentes afectados fueron el número de espigas fértiles por unidad de área y el número de granos por espiga.

De esta manera, los resultados del presente trabajo indican que el efecto de la interacción del genotipo, el suelo y el tipo de ambiente determinan el rendimiento del trigo; y principalmente está caracterizado por las limitaciones de la fuente a las que fue sometido el cultivo. En tanto, el componente que mejor explicó las variaciones en rendimiento fue el número de granos por m².

Conclusiones

Existió variabilidad entre los genotipos para todas las variables evaluadas, el rendimiento de grano y sus componentes fueron afectados por las condiciones de estrés a las que se sometieron los cultivos. La disminución de la fuente impuesta por defoliado disminuyó en mayor proporción el rendimiento, peso individual de grano, número de granos por m² y número de granos por espiga (15, 9, 5 y 5%). Por otra parte, bajo condiciones de déficit hídrico se redujo significativamente la biomasa, rendimiento, número de granos por m², peso individual de grano e índice de cosecha (9, 13, 5, 4 y 4%). El número de granos por m² fue el componente que se relacionó positivamente con el número de granos por espiga; de esta manera, las variaciones en el rendimiento tendieron a asociarse más por los cambios en el número de granos que por cambios en el peso del grano.

Agradecimientos

Cristobal Valdés Váldez, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado para realizar estudios de doctorado en Ciencias Agropecuarias

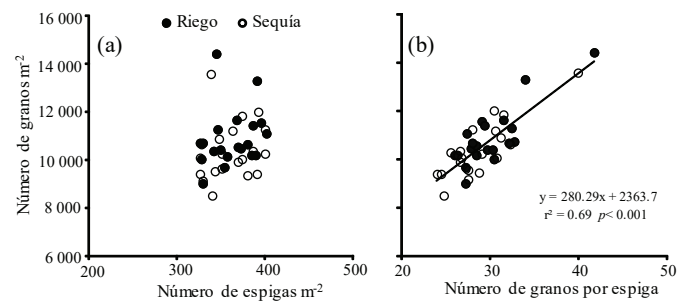


Figura 6. Relaciones entre el número de granos y número de espigas por m² (a) y el número de granos por espiga (b). En 20 líneas de trigo crecidas bajo condiciones de riego y sequía.

Figure 6. Relationships between number of grains and number of spikes per m² (a) and number of grains per spike (b). In 20 wheat lines grown under irrigation and drought conditions.

Thus, the results of the present study indicate that the effect of the interaction of the genotype, the soil and the type of environment determine the yield of the wheat; and is mainly characterized by the limitations of the source to which the crop was subjected. Meanwhile, the component that best explained the variations in yield was the number of grains per m².

Conclusions

There was variability among the genotypes for all variables evaluated, grain yield and its components were affected by the stress conditions to which the crops were subjected. The decreasing imposed defoliated source declined proportionally performance, single grain weight, number of grains per m² and number of grains per spike (15, 9, 5 and 5%). Moreover, under conditions of water deficit it was significantly reduced biomass yield, number of grains per m², single grain weight and harvest index (9, 13, 5, 4 and 4%). The number of grains per m² was the component that was positively related to the number of grains per spike; in this way, variations in yield tended to be associated more by changes in the number of grains than by changes in grain weight.

End of the English version



y Recursos Naturales en la Universidad Autónoma del Estado de México. El presente trabajo fue financiado a través del proyecto de investigación con clave “3350/2012G”.

Literatura citada

- Álvaro, F.; Royo, C.; García, del M. L.F. and Villegas, D. 2008b. Grain filling and dry matter translocation responses to source-sink modifications in a historical series of durum wheat. *Crop Sci.* 48:1523-1531.
- Bijanazadeh, E. and Emam, Y. 2010. Effect of source-sink manipulation on yield components and photosynthetic characteristic of wheat cultivars (*Triticum aestivum* and *T. Durum L.*). *J. Appl. Sci.* 10(7):564-569.
- Brisson, N.; Gate, P.; Gouache, D.; Charmet, G.; Oury, F.-X. and Huard, F. 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119: 201-212.
- Brancourt, H. M.; Doussinault, G.; Lecomte, C.; Bérard, P.; Le, B. B. and Trotter, M. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.* 43:37-45.
- Castañeda, S. M. C.; López, C. C.; Colinas de L, M. T. B.; Molina, J. C. and Hernández, L. A. 2009. Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero. *Interciencia.* 34(4):286-292.
- Chowdhary, M. A.; Mahmood, N.; Rashid, T. R. and Khaliq, I. 1999. Effect of leaf area removal on grain yield and its components in spring wheat. *Rachis* 18:75-78.
- Cossani, C. M.; Slafer, G. A. and Savin, R. 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Res.* 112:205-213.
- Estrada, C. G.; Miralles, D. J. and Slafer, G. A. 2008. Genotypic variability and response to water stress of pre and post-anthesis phases in triticale. *Eur. J. Agron.* 28(3):171-177.
- Fischer, R. A. 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: a reply to sinclair and jamieson. *Field Crops Res.* 105:15-21.
- Fischer, R. A. and Edmeades, G. O. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50: 85-98.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 246 p.
- González, N. O. E.; Griffiths, S.; Molero, G.; Reynolds, M. P. and Slafer, G. A. 2014. Dynamics of floret development determining differences in spike fertility in an elite population of wheat. *Field Crops Res.* 172:21-31.
- Giunta, F.; Motzo, R. and Deidda, M. 1993. Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 33:399-409.
- Jamieson, P. D.; Martin, R. J. and Francis, G. S. 1995. Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Sci.* 23:55-66.
- Koutroubas, S. D.; Fotiadis, S. and Damalas, C. A. 2012. Biomass and nitrogen accumulation and translocation in spelt (*Triticum spelta*) grown in a Mediterranean area. *Field Crops Res.* 127:1-8.
- Littell, R. C.; Milliken, G. A.; Stroup, W. W. and Wolfinger, R. D. 1996. SAS® System for mixed models. Cary, NC: SAS Institute Inc. 633 p.
- Miralles, D. J. and Slafer, G. A. 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *Journal of Agricultural Sci.* 145:139-149.
- Nicolas, M.E.; Lambers, H.; Gleadow, R.M. and Dallig, M. J. 1985. Effect of drought on metabolism and partitioning of carbon in two wheat varieties differing in drought tolerance. *Ann. Bot.* 55:727-742.
- Ortiz, M.; Silva, H.; Silva, P. and Acevedo, E. 2003. Leafwater parameters of wheat (*Triticum aestivum L.*) and their use in the selection of drought resistant genotypes. *Revista Chilena de Historia Natural.* 76:219-233.
- Palaniswamy, U. R. and Palaniswamy, K. M. 2006. Handbook of statistics for teaching and research in plant and crop science. The Harworth Press, Inc., New York. 624 p.
- Peltonen, S. P.; Kangas, A.; Salo, Y. and Jauhiainen, L. 2007. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Res.* 100:179-188.
- Rajala, A.; Hakala, K.; Mäkelä, P.; Muurinen, S. and Peltonen, S. P. 2009. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. *Field Crops Res.* 114:263-271.
- Ratley, A.; Shorter, R.; Chapman, S.; Dreccer, F. and Herwaarden, A. 2009. Variation for and relationships among biomass and grain yield component traits conferring improved yield and grain weight in an elite wheat population grown in variable yield environments. *Crop and Pasture Sci.* 60:717-729.
- Reynolds M. P.; Trethowan, R.; Crosa, J.; Vargas, M. and Sayre, K. D. 2004. Physiological factors associated with genotype by environment interaction in wheat. *Field Crops Res.* 85:253-274.
- Reynolds, M.; Foulkes, M. J.; Slafer, G. A.; Berry, P.; Parry, M. A. J.; Snape, J. W. and Angus, W. J. 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Exp. Bot.* 60: 1899-1918.
- Reynolds, M. P.; Bonnett, D.; Chapman, S. C.; Furbank, R. T.; Mans, Y.; Mather, D. E. and Parry, M. A. 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *J. Exp. Bot.* 62: 439-452.
- SAS Institute. 2002. SAS/STAT 9.0 User's guide. SAS Inst., Cary, NC.
- Sayre, K. D.; Rajaram, S. and Fischer, R. A. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Sci.* 37:36-42.
- Shearman, V. J.; Sylvester, B. R.; Scott, R. K. and Foulkes, M. J. 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Sci.* 45:175-185.
- Zadoks, J. C.; Chang, T. T. and Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14:415-421.
- Zhang, H.; Turner, N. C.; Simpson, N. and Poole, M. L. 2010. Growing-season rainfall, ear number and the water-limited potential yield of wheat in south-western Australia. *Crop Pasture Sci.* 61: 296-303.
- Zhang, H.; Turner, N. C. and Poole, M. L. 2012. Increasing the harvest index of wheat in the high rainfall zones of southern Australia. *Field Crops Res.* 129:111-123.
- Zhou, Y.; He, Z. H.; Chen, X. M.; Wang, D. S.; Yan J.; Xia, X. C. and Zhang, Y. 2007. Genetic improvement of wheat yield potential in North China. *In: Buck, H. T.; Nisi, J. E. and Salomon, N. (Eds.). Wheat production in stressed environments.* Springer, Dordrecht, The Netherlands. 583-589 pp.