

RESPONSE OF TUNISIAN DURUM (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) AND BREAD (*Triticum aestivum* L.) WHEATS TO WATER STRESS

RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRIGOS DUROS (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) Y HARINEROS (*Triticum aestivum* L.) DE TÚNEZ

Sourour Ayed^{1*}, Mohsen Rezgui², Afef Othmani¹, Mounir Rezgui², Hiba Trad³, Jaime A. Teixeira-da Silva⁴, Mongi Ben Younes¹, Hamadi Ben Salah², Mohamed Kharrat²

¹Regional Research Development Office of Agriculture in Semi Arid North West of Kef, Boulifa 7100-Kef, Tunisia. (ayedsourour@yahoo.fr). ²University of Carthage, Science and Agronomic Techniques Laboratory, National Agricultural Research Institute of Tunisia, Rue Hédi Karray 2049 Ariana, Tunisia. ³National Agronomic Institute of Tunisia, Genetic and Plant Breeding Laboratory, Department of Agronomy and Biotechnology, 43, Avenue Charles Nicole, 1082 Tunis, Tunisia. ⁴P. O. Box 7, Miki-cho post office, Ikenobe 3011-2, Kagawa-ken, 761-0799, Japan.

ABSTRACT

Wheat is a staple crop in Tunisia, but little is known about the response of Tunisian durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) to water stress. In semi-arid regions, where cereals are concentrated, grain yield is subject to water deficit especially due to variability in rainfall. Therefore, the objective of this study was to evaluate the response to water stress of three durum wheat (Mâali, Nasr and Salim) and two bread wheat (Tahent and Utique) varieties. The experimental design was a complete randomized block, water treatments were rainfed conditions (T0) and irrigation applied at the tillering and flowering stages (T1, control) with three replications per treatment, and data was analyzed by ANOVA and Tukey test to compare treatments means ($p \leq 0.05$). Variables analyzed were grain yield and yield-related components: plants per square meter (NP), tillers per square meter (NT), ears per square meter (NE), seed per ear (NSE) and 1000-kernel weight (TKW). NP, NE, NSE and TKW were significantly affected by water stress, but there was no change on NT. Seed yield was weakly correlated with NE ($r=0.376$) but significantly correlated with NSE ($r=0.604$) and NP ($r=0.639$). Supplemental irrigation increased grain yield by 74.4 %, 42.3 %, 36.1 %, 33.7 % and 24.5 % for Utique, Tahent, Nasr, Maâli and Salim, respectively, compared to control. Four drought tolerance indices, stress tolerance index (STI), stress tolerance (TOL), stress susceptibility index (SSI), and mean productivity (MP), were assessed and were adjusted based on grain yield under drought (Y_s) and normal (Y_p) conditions.

RESUMEN

El trigo es un cultivo básico en Túnez, aunque se sabe poco de la respuesta al estrés hídrico del trigo duro (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) y el trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) de Túnez. En regiones semiáridas, donde se concentran los cereales, el rendimiento de grano está sujeto al déficit hídrico, debido en especial a la variabilidad en la precipitación. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta al estrés hídrico de tres variedades de trigo duro (Mâali, Nasr y Salim) y dos de trigo harinero (Tahent y Utique). El diseño experimental fue bloques completamente al azar, los tratamientos fueron en condiciones de secano (T0) e irrigación aplicada en los estados de brote y floración (T1, testigo) con tres repeticiones por tratamiento, y los datos fueron analizados por ANDEVA y prueba de Tukey para comparar medias entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Las variables analizadas fueron el rendimiento de grano y componentes relacionados con el rendimiento: plantas por metro cuadrado (NP), brotes por metro cuadrado (NT), espigas por metro cuadrado (NE), semillas por espiga (NSE) y peso de 1000-semillas (TKW). NP, NE, NSE y TKW fueron afectados por el estrés hídrico significativamente, pero NT no presentó cambios. El rendimiento de semillas presentó correlación menor con NE ($r=0.376$), pero significativa con NSE ($r=0.604$) y NP ($r=0.639$). Riegos suplementarios aumentaron el rendimiento de granos 74.4 %, 42.3 %, 36.1 %, 33.7 % y 24.5 % en Utique, Tahent, Nasr, Mâali y Salim, respectivamente, comparado con el testigo. Cuatro índices de tolerancia se evaluaron y ajustaron al estrés hídrico, índice de tolerancia al estrés (STI), tolerancia al estrés (TOL), índice de susceptibilidad al estrés (SSI) y productividad promedio (MP), con base en rendimiento de grano bajo sequía (Y_s) y condiciones normales (Y_p). Una correlación positiva y significativa entre Y_s y Y_p con SSI y PM,

*Author for correspondence ❖ Autor responsable.

Received: May, 2015. Approved: November, 2015.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 51: 13-26. 2017.

A positive and significant correlation between Y_s and Y_p with SSI and PM , respectively, indicate that they are the most suitable variables to select wheat genotypes in drought stress. These indices were able to screen a drought-tolerant genotype (Nasr), which showed the highest STI (1.10). In contrast, Salim showed the lowest STI (0.47) and was considered to be a drought-susceptible genotype.

Key words: Water stress, durum wheat, bread wheat, grain yield, yield components.

INTRODUCTION

Plant growth is greatly influenced by environmental stresses including water deficit, salinity and extreme temperatures (De Leonardis *et al.*, 2007). Water availability is the most important factor affecting plant growth and yield, mainly in arid and semi-arid regions, where plants are often subjected to periods of water deficit (Khayatnezhad *et al.*, 2010). Plant responses to water deficit are influenced by the period, intensity, duration, and frequency of the stress as well as by plant-soil-atmosphere interactions (Saint Pierre *et al.*, 2012). Crop yield is reduced mostly when drought stress occurs during the heading or flowering stages (Johari-Pireivatlou and Maralian, 2011). In wheat, drought stress during maturity decreased yield by 10 %, but moderate stress during early vegetative growth had no effect on yield (Bauder, 2001). Water stress in wheat changes the patterns of plant growth and development (Dadbakhsh *et al.*, 2012). Depressed water potential suppresses cell division, organ growth, affects net photosynthesis and protein synthesis and alters the hormonal balance of plant tissues (Gusta and Chen, 1987). From an agronomic perspective, drought stress is a condition in which limited water supply prevents the growth or yield of a plant from attaining its genetic potential, while surpassing the plant's aptitude of homeostatic mechanisms to compensate for this deficit (Bürling *et al.*, 2013).

Aside from environmental or physiological conditions, increasing cereal yield is required to meet the 70 % predicted increment in global demand for food supply by 2050 (Semenov *et al.*, 2014). The demand for wheat in developing countries, would increase by 60 % in 2050 (He *et al.*, 2013). Wheat is one of the three world

respectivamente, indica que son las variables más adecuadas para seleccionar genotipos de trigo con estrés hídrico. Estos índices pudieron seleccionar un genotipo tolerante al estrés por sequía (Nasr), que presentó el STI más elevado (1.10). En contraste, Salim presentó el STI menor (0.47), y se le consideró un genotipo susceptible.

Palabras clave: Estrés hídrico, trigo duro, trigo harinero, rendimiento de grano, componentes de rendimiento.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las plantas se afecta fuertemente por estresantes como déficit hídrico, salinidad y temperaturas extremas (De Leonardis *et al.*, 2007). La disponibilidad del agua es el factor que más afecta el crecimiento y el rendimiento de las plantas, principalmente en regiones áridas y semiáridas, donde las plantas suelen experimentar períodos de déficit hídrico (Khayatnezhad *et al.*, 2010). Las respuestas de las plantas al déficit hídrico son influidas por el periodo, intensidad, duración y frecuencia del estrés, y las interacciones entre plantas, suelo y atmósfera (Saint Pierre *et al.*, 2012). El rendimiento de los cultivos se reduce más cuando el estrés hídrico ocurre durante las etapas de espigamiento o floración (Johari-Pireivatlou y Maralian, 2011). En el trigo, el estrés hídrico durante la madurez redujo 10 % el rendimiento, pero el estrés moderado durante el crecimiento vegetativo temprano no tuvo efecto en el rendimiento (Bauder, 2001). El estrés hídrico en el trigo cambia los patrones de crecimiento y desarrollo de la planta (Dadbakhsh *et al.*, 2012). El potencial hídrico menor suprime la división celular, el crecimiento de órganos, afecta la fotosíntesis neta y la síntesis de proteínas y altera el balance hormonal de los tejidos vegetales (Gusta y Chen, 1987). Desde una perspectiva agronómica, el estrés por sequía es una condición en la que un suministro limitado de agua evita que el crecimiento o el rendimiento de una planta alcance su potencial genético, mientras sobrepasa los mecanismos vegetales de aptitud homeostática para compensar este déficit (Bürling *et al.*, 2013).

Aparte de las condiciones ambientales o fisiológicas, el creciente rendimiento de granos debe alcanzar el aumento de 70 % pronosticado para la demanda global para la oferta alimenticia en el 2050 (Semenov *et al.*, 2014). La demanda de trigo en los países en

staple crops (Del Pozo *et al.*, 2014), bread wheat (*Triticum aestivum* L.) accounts for more than 90 % of global production and it is grown on over 100 000 million ha in more than 70 countries, whereas almost 5 % of global wheat production is durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*), of which 35 % comes from North Africa and Western Asia, 35 % from North America, and 30 % from the EU (He *et al.*, 2013). Cereals represent a basic food for the Tunisian population and thus have high social, economic and nutritional relevance (Zaied *et al.*, 2012). Wheat is a main ingredient in the traditional Tunisian diet, particularly in bread, couscous, pasta and biscuits, it is cultivated on about 1.6 million ha of the total agricultural land (5 million ha); in 2012, wheat production in Tunisia reached 1.1 million Mg, including 900 000 Mg of durum wheat and 200 000 Mg of bread wheat (Belkacem-Hanfi *et al.*, 2013).

Bread and durum wheat are among crops most influenced by increasing water stress and water scarcity in dry areas of the Mediterranean region (Karrou and Oweis, 2012). Durum wheat is more tolerant to stress than bread wheat (Marti and Slafer, 2014); although, evidence is not straightforward since there are few studies in which the performance of bread and durum wheat was directly compared. In Tunisia, land dedicated to cereals is concentrated in the Northern and North-Western regions where the climate varies from semi-arid to sub-humid. There, grain yield fluctuates significantly due to the inter-annual variability of rainfall, adding to seasonal moisture deficits, even through a wet year (Jemai *et al.*, 2013).

Wheat yield is often analyzed in terms of components (spikes per area, grains per ear, or grain size), and correlations among components are reported, but only partly understood. Compensations among components are one of the chief barriers to improve yield using this approach (Slafer *et al.*, 2014). Developing high-yielding wheat cultivars under water stress conditions in arid and semi-arid regions is the main objective of wheat breeding programs (Leilah and Al-Khateeb, 2005). Drought stress can reduce all yield components, but particularly the number of fertile spikes per unit area and the number of grains per ear (Abayomi and Wright, 1999), whereas kernel weight is negatively influenced by high temperatures and drought

vías de desarrollo aumentaría 60 % en 2050 (He *et al.*, 2013). El trigo es uno de los tres granos básicos mundiales (Del Pozo *et al.*, 2014); el trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) representa más de 90 % de la producción global y se siembra en más de 100 000 millones ha en más de 70 países, mientras que el trigo duro (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) representa casi 5 % de la producción mundial, de lo cual 35 % proviene del Norte de África y Asia occidental, 35 % de Norteamérica y 30 % de la UE (He *et al.*, 2013). Los cereales representan un alimento básico para la población tunecina y por ello tienen relevancia social, económica y nutricional (Zaied *et al.*, 2012). El trigo es un ingrediente principal en la dieta tunecina, especialmente en pan, couscous, pasta y galletas; se cultiva en alrededor de 1.6 millones ha del total de tierras agrícolas (5 millones ha); en el 2012, la producción de trigo en Túnez fue 1.1 millones Mg, incluyendo 900 000 Mg de trigo duro y 200 000 Mg de trigo harinero (Belkacem-Hanfi *et al.*, 2013).

Los trigos duro y harinero son de los cultivos con la mayor influencia del creciente estrés hídrico y la escasez de agua de la región Mediterránea (Karrou y Oweis, 2012). El trigo duro es más tolerante al estrés que el trigo harinero (Marti y Slafer, 2014), aunque la evidencia no es clara, porque hay pocos estudios en los que el rendimiento de los trigos duro y harinero fueron comparados de forma directa. En Túnez, la tierra dedicada a los cereales está concentrada en las regiones norte y noroccidental, donde el clima varía de semiárido a subhúmedo. Ahí, el rendimiento de granos oscila de manera significativa debido a su variabilidad interanual de precipitación, lo cual aumenta los déficits de humedad estacionales, incluso a lo largo de un año húmedo (Jemai *et al.*, 2013).

El rendimiento del trigo suele analizarse en términos de sus componentes (espigas por área, granos por espiga, o tamaño de grano), y se reportan correlaciones entre componentes, pero sólo se entienden parcialmente. Las compensaciones entre componentes son una de las barreras principales para mejorar el rendimiento usando este enfoque (Slafer *et al.*, 2014). El desarrollo de cultivares de trigo de alto rendimiento en condiciones de estrés hídrico en regiones áridas y semiáridas es el objetivo principal de los programas de mejoramiento de trigo (Leilah y Al-Khateeb, 2005). El estrés por sequía puede reducir todos los componentes de rendimiento, pero sobre todo el número de espigas

during ripening (Chmielewski and Kohn, 2000). In addition, Chen *et al.* (2012) reported that drought indices, which measure drought based on the decrease in grain yield under drought stress relative to watered conditions, are used to select drought-tolerant genotypes. In response to drought stress, there are several physiological and morphological strategies, varying from dehydration avoidance to dehydration tolerance (Saint Pierre *et al.*, 2012). Drought indices that provide a measure of drought based on the loss of yield under drought-conditions in comparison to normal conditions are used to screen drought-tolerant genotypes (Mitra, 2001). These indices are either based on drought resistance or on the susceptibility of genotypes to drought (Fernandez, 1992).

Drought tolerance consists of the ability of a crop to grow and produce under water deficit conditions (Khayatnezhad *et al.*, 2011). The plant avoids stress by different strategies, including deep rooting, reduced leaf area, reduced growth duration (early flowering), and mechanisms related to increased water use efficiency (WUE) (Saint Pierre *et al.*, 2012). Observable syndromes of plants exposed to water stress in the vegetative stage include leaf wilting, reduced plant height, area and number of leaves and a delay in the timing of flowers and flower bud formation (Guendouz *et al.*, 2014).

Good management of crops in the field and of soil humidity for appropriate utilization of soil, water and environmental resources play a significant role in the optimum growth and functioning of fundamental plant organs (Hakoomat *et al.*, 2013). Negative impacts of fluctuations in rainfall and dry periods on the production of rainfed crops may be overcome by supplemental irrigation (Karrou and Oweis, 2012). Yield increases with an increment in water supply, but when water surpasses a certain level (excessive irrigation), yield is negatively affected (Wang *et al.*, 2013). Appropriate irrigation can be used to effectively regulate the growth of plants, optimize phase allocation of water consumption, and guarantee high water consumption intensity during the flowering stage, which favors the growth of reproductive organs (Wang *et al.*, 2013). Supplemental irrigation is a highly efficient way to improve agricultural production (yield), including of wheat (Marano *et al.*, 2012), and increase livelihoods in dry, rainfed regions (Oweis and Hachum, 2006).

fértiles por área de unidad y el número de granos por espiga (Abayomi and Wright, 1999), mientras que el peso de los granos sufre la influencia negativa de las altas temperaturas y de la sequía durante la maduración (Chmielewski y Kohn, 2000). Además, Chen *et al.* (2012) reportaron que los índices de sequía, que miden la sequía con base en la reducción del rendimiento en estrés por sequía con relación a las condiciones de riego, se usan para seleccionar genotipos tolerantes a la sequía. En respuesta al estrés por sequía, hay varias estrategias fisiológicas y morfológicas que van desde evitar la deshidratación hasta la tolerancia a la deshidratación (Saint Pierre *et al.*, 2012). Índices de sequía que proporcionan una medición de sequía con base en la pérdida de rendimiento bajo condiciones de sequía, comparado con condiciones normales son usados para seleccionar genotipos tolerantes a la sequía (Mitra, 2001). Estos índices se basan en la resistencia a la sequía, o bien a la susceptibilidad de genotipos a la sequía (Fernandez, 1992).

La tolerancia a la sequía consiste en la habilidad de un cultivo de crecer y producir bajo condiciones de déficit hídrico (Khayatnezhad *et al.*, 2011). La planta evita el estrés con diferentes respuestas, como emisión de raíces profundas, área foliar reducida, duración reducida de crecimiento (floración temprana), y mecanismos relacionados con la mayor eficiencia de uso de agua (WUE) (Saint Pierre *et al.*, 2012). Síndromes observables de plantas expuestas al estrés hídrico en el estado vegetativo incluyen marchitamiento foliar, altura reducida de la planta, área y número de hojas y un retraso en la formación de flores y brotes (Guendouz *et al.*, 2014).

El manejo adecuado de los cultivos en el campo y de la humedad del suelo para el uso apropiado de suelo, agua y recursos ambientales tienen una función significativa en el crecimiento y funcionamiento óptimos de los órganos fundamentales de las plantas (Hakoomat *et al.*, 2013). Los impactos negativos de las fluctuaciones en precipitación y periodos secos sobre la producción de cultivos de riego pueden ser superados con riegos complementarios (Karrou y Oweis, 2012). El rendimiento aumenta con un incremento en el suministro de agua, aunque si el agua sobrepasa cierto nivel (riego excesivo), el rendimiento es afectado de forma negativa (Wang *et al.*, 2013). El riego adecuado puede usarse efectivamente para regular el crecimiento de las plantas, optimizar la fase

In Tunisia, Belhouchette *et al.* (2012) report that irrigated lands account for only 8 % of the total cultivated area (4.21 million ha). Nevertheless, these lands have strong effects on economic and social activities by ensuring 95 % of the market's vegetable production, 35 % of total agricultural production, 30 % of dairy products and 23 % of agrarian employment (Belhouchette *et al.*, 2012).

Plant yield achieved under drought and optimal conditions is used to develop indices of drought tolerance (Grzesiak *et al.*, 2013). According to Raman *et al.* (2012), stress tolerance (*TOL*) is defined as the difference in yield among stressed and non-stressed conditions, with higher values of *TOL* indicating the susceptibility of a given genotype, resulting in a stress susceptibility index (*SSI*) that evaluates the reduction in yield caused by unfavorable *versus* favorable conditions; lower *SSI* values show fewer differences in yield across stress levels, *i.e.*, greater resistance to drought.

Therefore, the objective of this study was to investigate the impact of supplementary irrigation applied at heading and anthesis stages on yield and yield-related components of durum wheat and bread wheat varieties under semi-arid conditions.

MATERIALS AND METHODS

A field study was conducted at Siliana, Tunisia, using three new durum wheat varieties (Nasr, Mâali and Salim) and the two most cultivated bread wheat varieties (Utique and the recently developed Tahent). The varieties were evaluated in contrasting water regimes: T0, rainfed conditions, (water stress); T1: irrigation applied at the tillering and flowering stages (well-watered; control); with three replications per treatment. Siliana lies in a semi-arid region located 130 km North-West of Tunisia (36° 4' 55" N, 9° 22' 29" E) with a 30-year mean between 300 and 450 mm annual rainfall and average temperature of 14.6 °C (Bergaoui and Louati, 2010). Temperature and rainfall from sowing to harvest are presented in Table 1.

The soil texture was a clay-loam with 12.5 % sand, 1.72 % organic matter, 11 ppm soil P₂O₅, 383 ppm K₂O, 69.55 ppm N, 51.91 % CaCO₃ and pH 7.9.

The experiment field received 100 kg ha⁻¹ of di-ammonium phosphate at sowing. Nitrogen (33.5 % ammonium nitrate) was applied post-sowing at 150 kg ha⁻¹ in two equal fractions (lifting and tillering). Seeding rates were 160 kg ha⁻¹ for durum wheat and 140 kg ha⁻¹ for bread wheat and plots (10 m×3 m)

de reparto del consumo de agua, y garantizar una alta intensidad de consumo de agua durante la etapa de floración, lo cual favorece el crecimiento de los órganos reproductivos (Wang *et al.*, 2013). El riego complementario es una manera eficiente de mejorar la producción agrícola (rendimiento), incluyendo la del trigo (Marano *et al.*, 2012), y de aumentar los recursos alimenticios en regiones secas y lluviosas (Oweis and Hachum, 2006).

En Túnez, Belhouchette *et al.* (2012) reportan que las tierras irrigadas representan sólo 8 % del área cultivada total (4.21 millones ha). Pero, estas tierras tienen fuertes efectos sobre las actividades económicas y sociales, porque aseguran 95 % de la producción del mercado de hortalizas, 35 % de la producción agrícola total, 30 % de productos lácteos y 23 % de empleos agrarios (Belhouchette *et al.*, 2012).

El rendimiento obtenido en condiciones de sequía y óptimas se usa para desarrollar índices de tolerancia a la sequía (Grzesiak *et al.*, 2013). Según Raman *et al.* (2012), la tolerancia al estrés (*TOL*) se define como la diferencia de rendimiento entre condiciones con y sin estrés, con valores mayores de *TOL* indicando la susceptibilidad de un genotipo dado, lo cual resulta en un índice de susceptibilidad al estrés (*SSI*) que evalúa la reducción en rendimiento causada por condiciones no favorables versus condiciones favorables; valores menores de *SSI* indican menos diferencias en rendimiento entre niveles de estrés.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue investigar el impacto del riego complementario aplicado en las etapas de espigamiento y anthesis sobre el rendimiento y componentes relacionados al rendimiento de variedades de trigos duro y harinero en condiciones semiáridas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Un estudio de campo se realizó en Siliana, Túnez, usando tres nuevas variedades de trigo duro (Nasr, Mâali y Salim) y las dos variedades de trigo harinero más cultivadas (Utique y la recién desarrollada Tahent). Las variedades se evaluaron en regímenes hídricos contrastantes: T0, bajo temporal (estrés hídrico); T1: riego aplicado en las etapas de amacollamiento y floración, (bastante agua; testigo); con tres réplicas por tratamiento. Siliana se encuentra en una región semiárida 130 km al noroeste de Túnez (36° 4' 55" N, 9° 22' 29" E), con un promedio de 30 años entre precipitaciones anuales de 300 a 450 mm y temperatura promedio de 14.6 °C (Bergaoui y Louati, 2010). La

Table 1. Mean temperature (°C) and rainfall (mm) during the growing cycle. Siliana, Tunisia (2012 to 2013).
Cuadro 1. Temperatura (°C) y precipitación (mm) promedio durante el ciclo de crecimiento. Siliana, Túnez (2012 a 2013).

Months	October	November	December	January	February	March	April
Rainfall (mm)	112.4	28.4	9.2	35.6	28.6	42.7	36.9
Temperature (°C)	26.8	21.8	16.2	15.1	13.9	20.5	23.6

were sown on December 24, 2012. All plots of the irrigation experiment were irrigated with a sprinkler system. Two irrigations were applied at the tillering and flowering stages (25 mm for each irrigation).

Five traits were measured: plants per square meter (NP), tillers per square meter (NT), ears per square meter (NE), seeds per ear (NSE) and 1000-kernel weight (TKW). To estimate the tolerance and susceptibility of varieties, the following indices were used:

Stress susceptibility index (*SSI*) was determined based on the mean yield of plants under suitable and stressed conditions. A low *SSI* indicates poor adaptability of plant yield under stress relative to non-stress conditions, resulting from greater drought tolerance of the plant (Fischer and Maurer, 1978).

$$SSI = 1 - (Y_{si} / Y_{pi}) / 1 - (Y_s / Y_p)$$

Tolerance (Rosielle and Hamblin, 1981): $TOL = Y_{pi} - Y_{si}$

Mean productivity (Rosielle and Hamblin, 1981):

$$MP = (Y_{pi} + Y_{si}) / 2$$

Stress tolerance index (Fernandez, 1992):

$$STI = (Y_{pi} \times Y_{si}) / (Y_p)^2$$

where Y_{pi} is mean yield of the variety under non-stressed conditions, Y_{si} is the mean yield of the variety under stress, Y_p is the mean yield of all varieties under non-stress conditions and Y_s is the mean yield of all varieties under stress.

Analysis of variance for each trait was performed and means (three replications) were compared using Tukey test ($p \leq 0.05$). These analyses were performed with SPSS ver. 16.0 (IBM SPSS Statistics; SPSS Inc., SPSS for Windows, 2007, Chicago, USA) software.

RESULTS AND DISCUSSION

Water stress significantly affected NP, NE, NSE and TKW, but NT was not changed. The interaction effect of treatment \times variety was significant for all traits, except NT and TKW (Table 2).

temperatura y precipitación de cultivo a cosecha se presentan en el Cuadro 1.

La textura del suelo era franco-arcillosa con 12.5 % arena, 1.72 % materia orgánica, 11 ppm suelo P_2O_5 , 383 ppm K_2O , 69.55 ppm N, 51.91 % $CaCO_3$ y pH 7.9.

El campo experimental recibió 100 kg ha^{-1} de fosfato diamónico a la siembra. El nitrógeno (33.5 % nitrato de amonio) post-siembra a 150 kg ha^{-1} en dos fracciones iguales (levantamiento y amacollamiento). Las tasas de producción de semilla fueron 160 kg ha^{-1} para el trigo duro y 140 kg ha^{-1} para el trigo harinero, y las parcelas (10 m \times 3 m) fueron sembradas el 24 de diciembre de 2012. Todas las parcelas del experimento de riego fueron regadas con un sistema de aspersión. Dos riegos fueron aplicados en las etapas de amacollamiento y floración (25 mm para cada riego).

Cinco caracteres se midieron: plantas por metro cuadrado (NP), amacollo por metro cuadrado (NT), espigas por metro cuadrado (NE), semillas por espiga (NSE) y peso de 1000 semillas (TKW). Para estimar la tolerancia y susceptibilidad de las variedades, se usaron los siguientes índices:

El índice de susceptibilidad al estrés (*SSI*) fue determinado con base en el rendimiento promedio de las plantas bajo condiciones adecuadas y de estrés. Un *SSI* bajo indica una baja adaptabilidad del rendimiento de las plantas bajo estrés relativo a condiciones sin estrés, que resultan de una mayor tolerancia a la sequía de la planta (Fischer Maurer, 1978).

$$SSI = 1 - (Y_{si} / Y_{pi}) / 1 - (Y_s / Y_p)$$

Tolerancia (Rosielle y Hamblin, 1981): $TOL = Y_{pi} - Y_{si}$

Productividad promedio (Rosielle y Hamblin, 1981):

$$MP = (Y_{pi} + Y_{si}) / 2$$

Índice de tolerancia al estrés (Fernandez, 1992):

$$STI = (Y_{pi} \times Y_{si}) / (Y_p)^2$$

donde Y_{pi} es el rendimiento promedio de la variedad bajo condiciones sin estrés, Y_{si} es el rendimiento promedio de la variedad bajo estrés, Y_p es el rendimiento promedio de todas las variedades bajo condiciones sin estrés y Y_s es el rendimiento promedio de todas las variedades bajo estrés.

Table 2. Analysis of variance of five traits for wheat varieties studied in irrigated and non-irrigated conditions. Siliana, Tunisia (2012-2013).**Cuadro 2. Análisis de varianza de cinco caracteres para variedades de trigo estudiadas en condiciones de riego y sin riego. Siliana, Túnez (2012-2013).**

Sources of variance	df	Tillers per square meter	Ears per square meter	Plants per square meter	1000-kernel weight (g)	Grains per ear
Variety	4	4.86**	286.36**	440.01**	66.87**	122.58**
Treatment	1	1.19 ns	669.77**	2.893**	19.09**	142.29**
Variety×Treatment	4	0.48 ns	138.06**	155.14**	1.40 ns	7.39*

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; ns: non significant; df: degrees of freedom. v * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; ns: no significativo; df: grados de libertad.

Our results showed a significant reduction in all traits in all varieties grown in drought conditions compared to irrigated conditions (Figure 1). This trend is similar to that found by Kiliç and Yagbasanlar (2010) in 14 durum wheat genotypes in which drought stress reduced the spikes per square meter, grains per ear and TKW. A greater reduction in all traits, yield and yield-related components were recorded in the drought-susceptible varieties compared to other varieties (Figure 1). Also, in comparison with bread wheat, durum wheat had greater grain yield under control (non-irrigated) conditions (Figure 1F). The rationale for allotting lower-yielding environments to durum wheat may be related to its greater affinity for marginal environments than bread wheat (Marti and Slafer, 2014) although, relative to barley and bread wheat, durum wheat has lower yield stability (Cossani *et al.*, 2011).

Nasr (durum wheat), under irrigated conditions, showed the best yield (4.1 Mg ha^{-1}) compared to Maâli (3.41 Mg ha^{-1}) and Salim (2.5 Mg ha^{-1}). Thus, Nasr is a suitable variety, in combination with irrigation, in order to improve yield. Tahent and Utique (bread wheats) show the same trend in seed yield in irrigated conditions (2.96 and 3.28 Mg ha^{-1}) and non-irrigated conditions (2.08 Mg ha^{-1} and 1.88 Mg ha^{-1} , respectively).

In our study, for most of the varieties, decreased significantly NP, NE, NSE and TKW under water stress, which is similar to the results reported by Akram (2011) in which water deficit applied at different growth stages reduced yield components in two cultivars of bread wheat. Li *et al.* (2013) report that drought and heat stress severely reduced the TKW of durum wheat; besides, water stress decreases biomass, tillering ability, grain size and number of grains per ear at any phase (Akram,

Análisis de varianza se realizaron para cada caracter y los promedios (tres réplicas) fueron comparados con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Estos análisis fueron realizados con SPSS ver. 16.0 (IBM SPSS Statistics; SPSS Inc., SPSS for Windows, 2007, Chicago, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estrés hídrico afectó de forma significativa a NP, NE, NSE y TKW, aunque no hubo cambios en NT. La interacción efecto de tratamiento×variedad fue significativa para todos los rasgos, excepto NT y TKW (Cuadro 2).

Nuestros resultados mostraron una reducción significativa en todos los caracteres en todas las variedades sembradas en condiciones de sequía, comparado con las condiciones bajo riego (Figura 1). Esta tendencia es similar a la hallada por Kiliç and Yagbasanlar (2010) en genotipos de trigo duro en los que el estrés por sequía redujo el número de espigas por metro cuadrado, granos por espiga y TKW. Una reducción mayor en todos los caracteres, rendimiento y componentes relacionados al rendimiento se registraron en las variedades susceptibles a la sequía, comparado con otras variedades (Figura 1). Además, comparado con el trigo harinero, el trigo duro presentó mayor rendimiento de grano en el testigo (sin riego) (Figura 1F). El motivo para asignar ambientes que reducen el rendimiento del trigo duro puede relacionarse con su afinidad mayor a los ambientes marginales, que el trigo harinero (Marti and Slafer, 2014), pero respecto a la cebada y el trigo harinero, el trigo duro tiene menos estabilidad de rendimiento (Cossani *et al.*, 2011).

Nasr (trigo duro) en condiciones de riego mostró el rendimiento mayor (4.1 Mg ha^{-1}) en comparación con Maâli (3.41 Mg ha^{-1}) y Salim

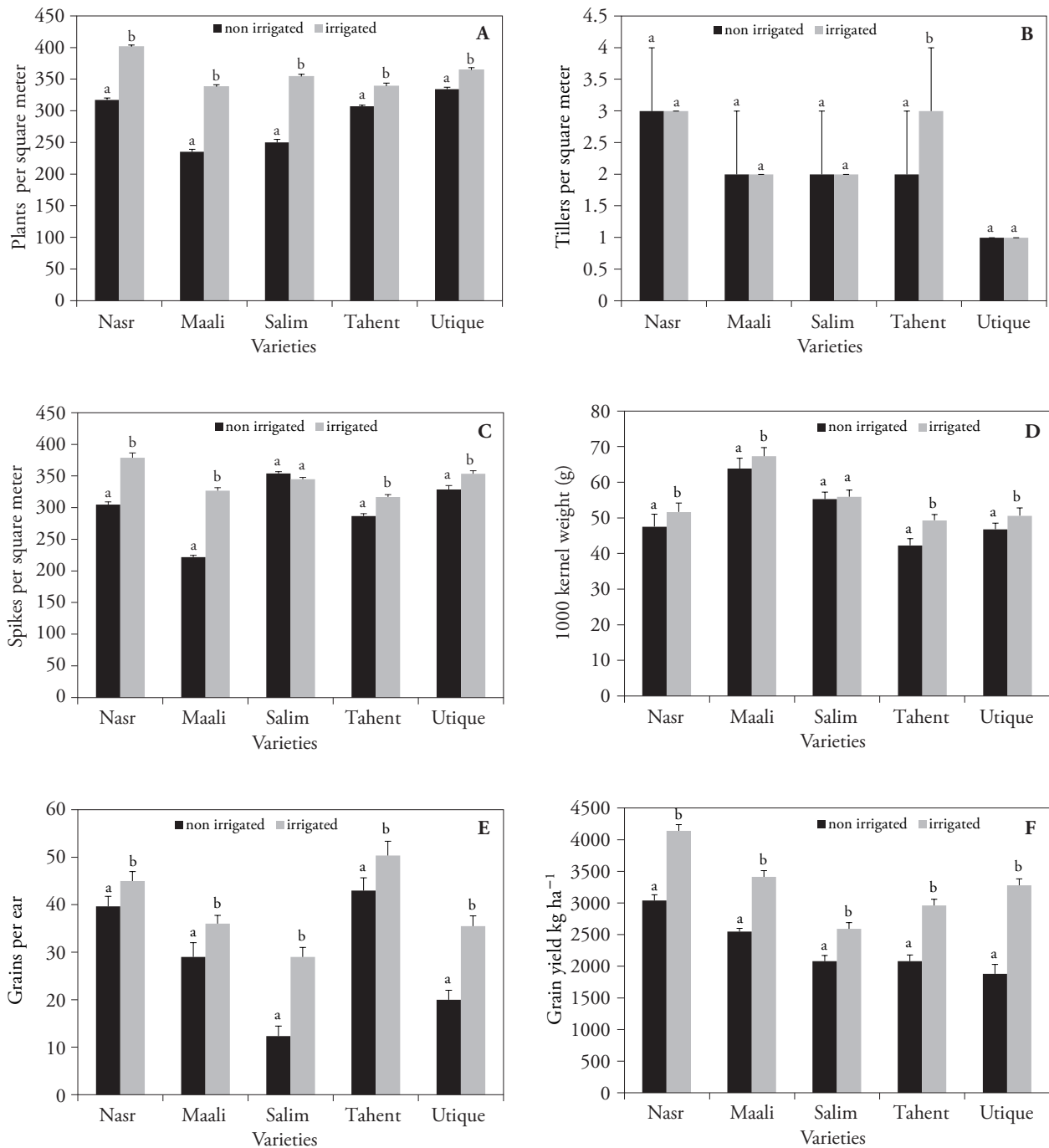


Figure 1. Effect of irrigation on grain yield ha⁻¹ and its components.

Figura 1. Efecto del riego sobre rendimiento de grano ha⁻¹ y sus componentes.

Means with different letters for each irrigation regime are statistically different ($p \leq 0.05$) ❖ Medias con letras diferentes para cada régimen de riego son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$)

2011). Grain yield decreased under water stress compared to the control for all varieties (Figure 1F) and, according to Akram (2011), drying soils decrease yield and yield-related components of a plant, even in tolerant genotypes.

(2.5 Mg ha⁻¹). Por ello, Nasr se considera una variedad adecuada, en conjunto con el riego, para mejorar el rendimiento. Tahent y Utique (trigos harineros) reportan la misma tendencia en el rendimiento de semillas en condiciones de riego (2.96 y

According to Richards (2006), the reasons for lower grain yield under stress are mainly a reduction in the number of spikes per plant, number of grains per ear and number of tillers per plant. Pedro *et al.* (2012) show that yields were better explained by grain number than by the average grain weight for both crop and individual plant, and that yield was linked to the number of grains (per plant in isolated plants, and per m² in crop stands). In a field study, grain weight was higher in five genotypes of durum wheat than in five genotypes of bread wheat under contrasting treatments of water (rainfed and irrigation at different stage) and nitrogen (Marti and Slafer, 2014).

Supplemental irrigation increased grain yield by 74.4 %, 42.3 %, 36.1 %, 33.7 % and 24.5 % in Utique, Tahent, Nasr, Maâli and Salim, respectively, compared with rainfed conditions (Figure 1F). These results are similar to those observed in bread wheat: 1) Sarwar *et al.* (2010) point out that bread wheat yield increased with increasing irrigation levels: I5 increased grain yield by 124.8 % followed by I4 (113.8 %), more than I1 treatment (I1=irrigation at the crown root stage; I4=irrigation at the crown root, tillering, booting and earing stages; I5=irrigation at the crown root, tillering, booting, earing and milking stages); 2) Mesbah (2009) report that irrigation water (3809 m³ ha⁻¹) significantly increased grain yield; 3) for durum wheat, Guendouz *et al.* (2012) show a 12.42 % difference in grain yield under stressed (rainfed) and non-stressed condition (irrigation).

Johari-Pireivatlou and Maralian (2011) show that grain yield in 10 bread wheat cultivars, which was based on the mean value across all cultivars, decreased by 39 % under water stress compared to the control. In *T. aestivum*, Liu and Li (2005) point out that severe drought stress (rainfed conditions) caused a 13 % reduction in grain yield, as compared with the well-watered treatment.

According to Maralian *et al.* (2010), if water stress occurred at the tillering or heading stages of bread wheat, grain yield decreased more than 37 %. Drought and high temperature during anthesis reduced the storage capacity of cereal grains by decreasing the number of endosperm cells or the number of amyloplasts initiated (Jones *et al.*, 1996), and can reduce the final kernel size by limiting the rate and duration of the filling process,

3.28 Mg ha⁻¹) y sin riego (2.08 Mg ha⁻¹ y 1.88 Mg ha⁻¹, respectivamente).

En nuestro estudio, la mayoría de las variedades, disminuyeron significativamente NP, NE, NSE y TKW en estrés hídrico, similar a lo reportado por Akram (2011), donde el déficit hídrico aplicado en diferentes etapas de crecimiento redujo los componentes del rendimiento en dos cultivares de trigo harinero. Li *et al.* (2013) reportan que el estrés por sequía y por calor redujeron, de forma severa, TKW del trigo duro. Además, el estrés hídrico reduce biomasa, habilidad de amacollamiento, tamaño de grano y número de granos por espiga en cualquier fase (Akram, 2011). El rendimiento de grano se redujo bajo estrés hídrico comparado con el testigo para todas las variedades (Figura 1F) y, según Akram (2011), los suelos secos reducen el rendimiento y los componentes relacionados con el rendimiento de una planta, incluso en genotipos tolerantes.

Según Richards (2006), las causas del menor rendimiento de grano en estrés son, principalmente, una reducción en el número de espigas por planta, número de granos por espiga y número de amacollos por planta. Pedro *et al.* (2012) muestran que los rendimientos se explican mejor por el número de granos que por su peso promedio, tanto para el cultivo como para la planta individual, y que el rendimiento estaba vinculado al número de granos (por planta en plantas aisladas, y por m² en densidad de plantas). En un estudio de campo, el peso de grano fue mayor en cinco genotips de trigo duro que en cinco genotipos de trigo harinero en tratamientos contrastantes de agua (temporal y riego en diferentes etapas) y nitrógeno (Marti y Slafer, 2014).

El riego complementario aumentó 74.4 %, 42.3 %, 36.1 %, 33.7 % y 24.5 % el rendimiento de grano en Utique, Tahent, Nasr, Maâli y Salim, respectivamente, comparado con condiciones de riego (Figura 1F). Estos resultados son similares a los observados en el trigo harinero: 1) Sarwar *et al.* (2010) señalan que el rendimiento del trigo harinero aumentó con mayores niveles de riego: I5 aumentaron 124.8 % el rendimiento de grano, seguido de I4 (113.8 %), más de I1 tratamiento (I1=riego en la etapa de emisión de las raíces de la corona; I4=riego en las etapas de emisión de las raíces de la corona, amacollamiento, embuche y formación de las espigas; I5=riego en las etapas de emisión de las raíces de la corona, amacollamiento, embuche,

causing earlier physiological maturity (Gupta *et al.*, 2001).

A decrease in NE, NSE and NP reduced grain yield (Table 3), which showed a positive significant correlation with NE ($r=0.376^*$) and NSE ($r=0.604^{**}$), corroborating the results of Johari-Pireivatlou and Maralian (2011) who report that grain yield had a positive and significant correlation with ears per square meter, grains per ear and 1000 kernel weight in 10 bread wheat varieties. NSE was also correlated ($r=0.36$) with grain yield ha^{-1} .

Simane *et al.* (1993) point out that the grains per ear had significant, positive and direct effects on grain yield under moisture stress as well as under well-watered conditions. The number of spikes per square meter is mainly accountable for coarse regulations determined by environmental factors, whereas while the number of grains per ear is mostly responsible for coarse regulations caused by genotypic differences (Slafer *et al.*, 2014). Our results (Table 3) showed that NSE and NP contributed more to enhance total yield than other traits. Grain yield depends on spike length, 1000-kernel weight and the number of effective tillers (Bayoumi *et al.*, 2008).

Plant yield is explained by the number of grains per plant, whereas the average weight of grains is less important in determining yield (Pedro *et al.*, 2012). Grain number seems to be most important in response to large differences in yield conditions than grain weight (Slafer *et al.*, 2014).

The ability of plant cultivars to perform well in drought-stressed conditions is paramount for the stability of yield production. The relative yield performance of cultivars in drought-stressed and non-stressed conditions may be used as a pointer

formación de las espigas y estadio de grano lechoso); 2) Mesbah (2009) reporta que el agua de riego ($3809 m^3 ha^{-1}$) aumentó el rendimiento de grano significativamente; 3) para el trigo duro, Guendouz *et al.* (2012) muestran una diferencia de 12.42 % en el rendimiento de grano en condiciones de estrés (temporal) y sin estrés (riego).

Johari-Pireivatlou y Maralian (2011) muestran que el rendimiento de grano en 10 cultivares de trigo harinero, con base en el valor promedio de todos los cultivares, disminuyó 39 % con estrés hídrico comparado con el testigo. En *T. aestivum*, Liu y Li (2005) señalan que el estrés severo por sequía (condiciones de temporal) redujo 13 % el rendimiento de grano, comparado con el tratamiento con buen riego.

Según Maralian *et al.* (2010), si el estrés hídrico ocurre en las etapas de amacollamiento o espigamiento del trigo harinero, el rendimiento disminuyen más de 37 %. La sequía y temperaturas altas durante el antesis reducen la capacidad de almacenamiento de los granos de cereales al reducir el número de células del endospermo o de amiloplastos iniciados (Jones *et al.*, 1996), y pueden reducir el tamaño final de la semilla al limitar la tasa y duración del proceso de llenado, causando madurez fisiológica prematura (Gupta *et al.*, 2001).

Una reducción de NE, NSE y NP disminuyó el rendimiento de grano (Cuadro 3), el cual mostró una correlación significativa positiva con NE ($r=0.376^*$) y NSE ($r=0.604^{**}$), lo que corrobora los resultados de Johari-Pireivatlou y Maralian (2011), quienes reportan que el rendimiento se correlacionó positiva y significativamente con las espigas por metro cuadrado, granos por espiga y el paso de 1000 granos en 10 variedades de trigo harinero. NSE también se

Table 3. Pearson correlation coefficients among traits on wheat varieties. Siliana, Tunisia (2012-2013).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre rasgos en variedades de trigo. Siliana, Túnez (2012-2013).

	Tillers per square meter	Ears per square meter	Plants per square meter	1000 kernel weight	Grains per ear	Grain yield
Tillers per square meter	1					
Ears per square meter	-0.043	1				
Plants per square meter	0.026	0.677**	1			
1000-kernel weight	-0.202	-0.172	-0.247	1		
Grains per ear	0.317	-0.048	0.517**	-0.234	1	
Grain yield	0.141	0.376*	0.639**	0.235	0.604**	1

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

to recognize drought-resistant cultivars in breeding for drought-prone environments. Several drought indices were proposed on the basis of a mathematical link among yield under drought conditions and non-stressed conditions. These indices are based on drought resistance or drought susceptibility of cultivars (Raman *et al.*, 2012).

Based on grain yield under rainfed and irrigated conditions, drought tolerance indices (*STI*, *SSI*, *TOL* and *MP*) were calculated (Table 4). *STI* varied in different varieties, from 0.47 in Salim to 1.10 in Nasr. Nasr displayed the highest *STI* and the highest grain yield under drought and control conditions (Figure 1F). Ashraf *et al.* (2015) report that *STI* is a useful means to determine high yield and stress tolerance potential of bread wheat.

Utique had the highest *TOL* (Table 4), which indicates that it had a large decrease in grain yield under drought conditions and thus higher drought sensitivity. These results agree with those obtained by Nouri *et al.* (2011), who found that a durum wheat genotype, G4, had a greater *TOL* value, which indicated that a higher drought sensitivity and larger reduction in grain yield under rainfed conditions.

All the morphological traits assessed in this study (NP, NT, NE, NSE and TKW) and different indices (*STI*, *TOL*, *SSI* and *MP*) could explain some of the mechanisms related to drought tolerance and may be useful in breeding programs for screening and selecting drought-tolerant varieties. A positive and significant correlation was observed between Y_s and Y_p with *STI* and *MP* (Table 5). Thus, *STI* and *MP*

correlacionó ($r=0.36$) positivamente con el rendimiento de grano ha^{-1} .

Simane *et al.* (1993) señalan que los granos por espiga tuvieron efectos significativos, positivos y directos en el rendimiento de grano bajo estrés por humedad, así como bajo condiciones de buen riego. El número de espigas por metro cuadrado es responsable de las regulaciones ordinarias determinadas por los factores ambientales, mientras que el número de granos por espiga es responsable de las regulaciones ordinarias causadas por las diferencias genotípicas (Slafer *et al.*, 2014). Nuestros resultados (Cuadro 3) mostraron que NSE y NP contribuyeron más que otros caracteres a mejorar el rendimiento total. El rendimiento depende de la longitud de la espiga, el peso de 1000 semillas y el número de amacollos efectivos (Bayoumi *et al.*, 2008).

El rendimiento de plantas se explica por el número de granos por planta, mientras que el peso promedio de los granos es menos importante al momento de determinar el rendimiento (Pedro *et al.*, 2012). El número de granos parece ser más importante en respuesta a diferencias grandes en condiciones de rendimiento que el peso de granos (Slafer *et al.*, 2014).

La habilidad de los cultivares de rendir bien en condiciones de estrés por sequía es fundamental para la estabilidad de la producción de rendimiento. El desempeño del rendimiento relativo de los cultivares en condiciones de estrés por sequía y sin estrés puede usarse como un marcador para reconocer cultivares resistentes a la sequía en el mejoramiento por ambientes propensos a la sequía. Varios índices de sequía se propusieron con base en un vínculo

Table 4. Drought tolerance and susceptibility indices for wheat varieties studied in irrigated and non-irrigated conditions. Siliana, Tunisia (2012-2013).

Cuadro 4. Índices de tolerancia a la sequía y susceptibilidad para variedades de trigo estudiadas en condiciones de riego y sin riego. Siliana, Túnez (2012-2013).

Varieties	<i>SSI</i>	<i>STI</i>	<i>MP</i>	<i>TOL</i>
Nasr	1.08 b	1.10 a	35.90 a	11.00 b
Maáli	1.04 b	0.76 b	29.80 b	8.61 c
Salim	0.80 c	0.47 c	23.35 c	5.10 d
Tahent	0.81 c	0.63 b	25.20 c	8.80 c
Utique	1.16 a	0.63 b	25.80 c	14.00 a

STI: stress tolerance index, *TOL*: stress tolerance, *SSI*: stress susceptibility index, *MP*: mean productivity. Values with different letters in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$) ❖ *STI*: índice de tolerancia al estrés, *TOL*: tolerancia al estrés, *SSI*: índice de susceptibilidad al estrés, *MP*: productividad promedio. Valores con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Table 5. Pearson correlation coefficients among drought tolerance indices. Siliana, Tunisia (2012-2013). Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre índices de tolerancia a la sequía. Siliana, Túnez (2012-2013).

	Y_s	Y_p	SSI	STI	MP	TOL
Y_s	1					
Y_p	0.823	1				
SSI	-0.408	0.182	1			
STI	0.964**	0.941*	-0.159	1		
MP	0.945*	0.964**	-0.086	0.996**	1	
TOL	0.019	0.584	0.903*	0.278	0.347	1

* $p \leq 0.05$; ** highly significant $p \leq 0.01$.

Y_s : mean yield of all varieties under stress, Y_p : mean yield of all varieties under non-stress conditions, SSI : stress susceptibility index, STI : stress tolerance index, MP : mean productivity, TOL : stress tolerance ❖ Y_s : rendimiento promedio de todas las variedades en estrés, Y_p : rendimiento promedio de todas las variedades en condiciones sin estrés, SSI : índice de susceptibilidad al estrés, STI : índice de tolerancia al estrés, MP : productividad promedio, TOL : tolerancia al estrés.

can be suitable to screen drought-tolerant varieties of both durum and bread wheats.

CONCLUSION

Supplemental irrigation increase most yield-related traits as well as grain yield of durum and bread wheat. The differential responses of different varieties to water stress points to the drought tolerant ability of wheat. Based on their positive and significant correlation coefficient with Y_s and Y_p , both STI and PM were the most suitable indexes to screen wheat genotypes under drought stress conditions. According to the indices, Salim was the most drought-susceptible genotype, whereas Nasr was the most drought-tolerant genotype. Thus, Nasr is thus suitable for cultivation in semi-arid regions.

LITERATURE CITED

- Abayomi, Y. A., and D. Wright. 1999. Osmotic potential and temperature effects on germination of spring wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) Trop. Agric. (Trinidad). 76: 114-119.
- Akram, M. 2011. Growth and yield components of wheat under water stress of different growth stages. Bangladesh J. Agric. Res. 36: 455-468.
- Ashraf, A. A. E. M., M. A. Abd El-Shafi, E. M. S. Gheith, and H. S. Suleiman. 2015. Using different statistical procedures for evaluating drought tolerance indices of bread wheat genotypes. Adv. Agric. Biol. 4: 19-30.
- Bauder, J. 2001. Irrigation with Limited Water Supplies. Montana State University, Communications Services. Montana Hall. Bozeman, MT 59717. USA.

matemático entre rendimiento bajo condiciones de sequía y condiciones de sin estrés. Estos índices se basan en la resistencia o la susceptibilidad a la sequía de los cultivares (Raman *et al.*, 2012).

Con base en el rendimiento bajo condiciones de riego y de temporal, se calcularon los índices de tolerancia a la sequía (STI , SSI , TOL y MP) (Cuadro 4). STI varió en diferentes variedades, que van de 0.47 en Salim, a 1.10 en Nasr. Nasrhad presentó el STI más alto y el rendimiento más alto bajo condiciones de sequía y control (Figura 1F). Ashraf *et al.* (2015) reportan que el STI es un medio útil para determinar un rendimiento y potencial de tolerancia al estrés altos para el trigo harinero.

Utique obtuvo el TOL más alto (Cuadro 4), lo que indica que tiene una gran reducción en rendimiento bajo condiciones de sequía y, así, mayor sensibilidad a la sequía. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Nouri *et al.* (2011), quienes encontraron que un genotipo de trigo duro, G4, tenía un valor mayor de TOL , lo que indicaba una mayor sensibilidad a la sequía y una mayor reducción de rendimiento bajo condiciones de temporal.

Todos los rasgos morfológicos evaluados en este estudio (NP , NT , NE , NSE y TKW) y los diferentes índices (STI , TOL , SSI y MP) podrían explicar algunos mecanismos relacionados con la tolerancia a la sequía y serían útiles en programas de mejoramiento para la evaluación y la selección de variedades tolerantes a la sequía. Entre Y_s y Y_p con STI y MP hubo una correlación positiva y significativa (Cuadro 5).

- Bayoumi, T. Y., M. H. Eid, and E. M. Metwali. 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *African J. Biotech.* 7: 2341-2352.
- Belhouchette, H., M. Blanco, J. Wery, and G. Flichman. 2012. Sustainability of irrigated farming systems in a Tunisian region: A recursive stochastic programming analysis. *Computers Electron. Agric.* 86: 100-110.
- Belkacem-Hanfi, N., N. Semmar, I. Perraud-Gaime, A. Guesmi, M. Cherni, I. Cherif, A. Boudabous, and S. Roussos. 2013. Spatio-temporal analysis of post-harvest moulds genera distribution on stored durum wheat cultivated in Tunisia. *J. Stored Prod. Res.* 55: 116-123.
- Bergaoui, M., and M. H. Louati. 2010. Drought effects on reservoirs inflows in Tunisia: Case of Lakhmess and Siliana reservoirs. *In: López-Francos A. (comp), López-Francos A. (collab). Economics of Drought and Drought Preparedness in a Climate Change Context. Zaragoza: CIHEAM / FAO / ICARDA /GDAR / CEIGRAM / MARM p: 75-78.*
- Bürling, K., G. Cerovic Zoran, G. Cornic, J. M. Ducruet, G. Noga, and M. Hunsche. 2013. Fluorescence-based sensing of drought-induced stress in the vegetative phase of four contrasting wheat genotypes. *Environ. Exp. Bot.* 89: 51-59.
- Chen, X., D. Min, T. Ahmad Yasir, and Y. G. Hu. 2012. Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD). *Field Crop Res.* 137: 195-201.
- Chmielewski, F., and W. Köhn. 2000. Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agr. For. Meteorol.* 102: 253-261.
- Cossani, C. M., A. G. Slafer, and R. Savin. 2011. Do barley and wheat (bread and durum) differ in grain weight stability through seasons and water-nitrogen treatments in a Mediterranean location? *Field Crop Res.* 121: 240-247.
- Dadbakhsh, A., A. Yazdansepa, and M. Ahmadizadeh. 2012. Influence of water deficit on yield and some quantitative traits in wheat genotypes. *Curr. Res. J. Biol. Sci.* 4: 75-81.
- De Leonadis, A. M., D. Marone, E. Mazzucotelli, F. Neffar, F. Rizza, N. Di Fonzo, L. Cattivelli, and A. M. Mastrangelo. 2007. Durum wheat genes up-regulated in the early phases of cold stress modulated by drought in a developmental and genotype dependent manner. *Plant Sci.* 172: 1005-1016
- Del Pozo, A., I. Matus, M. D. Serret, and J. L. Araus. 2014. Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. *Environ. Exp. Bot.* 103: 180-189.
- Fernandez, G. C. J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *In: Proceedings of International Symposium on Adaptation of Vegetative and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Taiwan* 13: 257-270.
- Fischer, R.A., and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield response. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 897-907.
- Grzesiak, M. T., P. Waligorski, F. Janowiak, I. Marcinska, K. Hura, P. Szczyrek, and T. Głab. 2013. The relations between drought susceptibility index based on grain yield (DSIGY)

Por ende, *STI* y *MP* pueden ser adecuados para seleccionar variedades de trigos duros y harineros.

CONCLUSIONES

El riego complementario aumenta la mayoría de los caracteres relacionados con el rendimiento, así como el rendimiento de grano de los trigos rudo y harinero. Las respuestas diferenciales de diversas variedades al estrés hídrico apunta a la habilidad de tolerancia a la sequía del trigo. Con base en su correlación positiva y significativa con Y_s y Y_p , tanto *STI* como *PM* son los índices más adecuados para seleccionar genotipos de trigo en condiciones de estrés por sequía. En los índices estudiados, Salim fue el genotipo más susceptible a la sequía, mientras que Nasr fue el más tolerante a la sequía. Por lo tanto, Nasr es adecuado para cultivarse en regiones semiáridas.

—Fin de la versión en español—



- and key physiological seedling traits in maize and triticales genotypes. *Acta Physiol. Plant* 35: 549-565.
- Guendouz, A., S. Guessoum, K. Maamari, and M. Hafsi. 2012. The effect of supplementary irrigation on grain yield, yield components and some morphological traits of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. *Adv. Environ. Biol.* 6(2): 564-572.
- Guendouz, A., M. Hafsi, Z. Khebbat, L. Moumeni, and A. Achiri. 2014. Evaluation of grain yield, 1000 kernels weight and chlorophyll content as indicators for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Adv. Agric. Biol.* 1 (2): 89-92.
- Gupta, N. K., S. Gupta, and A. Kumar, 2001. Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield of wheat cultivars at different stages. *J. Agron. Crop Sci.* 186: 55-62.
- Gusta, L. V. and T. H. H. Chen. 1987. The physiology of water and temperature stress. *In: Heyne, E. G. (ed). Wheat and Wheat Improvement. USA, pp: 115-150.*
- Hakoomat, A., I. Nadeem, A. Shakeel, S. Ahmad Naem, and S. Naem. 2013. Performance of late sown wheat crop under different planting geometries and irrigation regimes in arid climate. *Soil Tillage Res.* 130: 109-119.
- He, Z., A. K. Joshi, and W. Zhang. 2013. Understanding and Addressing Threats to Essential Resources. *In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, from Climate Vulnerability. Elsevier, Vol. 2, pp: 57-67.*
- Jemai, I., N. Ben Aissa, S. Ben Guirat, M. Ben-Hammouda, and T. Gallali. 2013. Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. *Soil Tillage Res.* 126: 26-33.

- Johari-Pireivatlou, M., and H. Maralian. 2011. Evaluation of 10 wheat cultivars under water stress at Moghan (Iran) condition. *Afr. J. Biotechnol.* 10: 10900-10905.
- Jones, R. J., B. M. N. Schreiber, and J. A. Roessler. 1996. Kernel sink capacity in maize: genotype and maternal regulation. *Crop Sci.* 36: 301-306.
- Karrou, M., and T. Oweis. 2012. Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment. *Agr. Water Manage.* 107: 94-103.
- Khayatnezhad, M., R. Gholamin, S. H. Jamaati-Somarin, and R. Zabihi-Mahmoodabad. 2010. Effects of PEG stress on corn cultivars (*Zea mays* L.) at germination stage. *World Appl. Sci. J.* 11: 504-506.
- Khayatnezhad, M., R. Gholamin, S. H. Jamaati-e-Somarin, and R. Zabihi Mahmoodabad. 2011. The leaf chlorophyll content and stress resistance relationship considering in corn cultivars (*Zea mays*) *Adv. Environ. Biol.* 5: 118-122.
- Kiliç, H., and T. Yagbasanlar. 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) cultivars. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj* 38: 164-170.
- Leilah, A. A., and S.A. Al-Khateeb. 2005. Statistical analysis of wheat yield under drought conditions. *J. Arid Environ.* 61: 483-496.
- Li, Y.F., Y. Wu, N. Hernandez-Espinosa, and J. R. Peña. 2013. Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cereal Sci.* 57: 398-404.
- Liu, H. S., and F. M. Li. 2005. Root respiration, photosynthesis and grain yield of two spring wheat in response to soil drying. *Plant Growth Regul.* 46: 233-240.
- Maralian, H., A. Ebadi, R. Didar, and B. Haji-Eghrari. 2010. Influence of water deficit stress on wheat grain yield and proline accumulation rate. *Afr. J. Agric. Res.* 5: 286-289.
- Marano, P. R., R. L. Maumary, L. N. Fernandez, and L. M. Rista. 2012. Epidemiology of the diseases of wheat under different strategies of supplementary irrigation. *Int. J. Agron.* Article ID 407365: 11 p.
- Marti, J., and G. A. Slafer. 2014. Bread and durum wheat yields under a wide range of environmental conditions. *Field Crop Res.* 156: 258-271.
- Mesbah, E. A. E. 2009. Effect of irrigation and foliar spraying of potassium on yield, yield components and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) in sandy soils. *World J. Agric. Sci.* 5: 662-669.
- Mitra, J. 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Curr. Sci.* 80: 758-762.
- Nouri, A., A. Etminan, J. A. Teixeira da Silva, and R. Mohammad. 2011. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turgidum* var. *durum* Desf.). *Aust. J. Crop Sci.* 5: 8-16.
- Oweis, T., and A. Hachum. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agric. Water Managem.* 80: 57-73.
- Pedro, A., R. Savina, and G.A. Slafer. 2012. Crop productivity as related to single-plant traits at key phenological stages in durum wheat. *Field Crop Res.* 138: 42-51.
- Pedro, A., R. Savin, M. A. J. Parry, and G. A. Slafer. 2012. Selection for high grain number per unit stem length through four generations from mutants in a durum wheat population to increase yields of individual plants and crops. *Field Crop Res.* 129: 59-70.
- Raman, A., B. Verulkar Satish, P. Mandal Nimai, M. Variar, V. D. Shukla, J. L. Dwivedi, B. N. Singh, O. N. Singh, P. Swain, K. Mall Ashutosh, S. Robin, R. Chandrababu, A. Jain, T. Ram, S. Hittalmani, S. Haefele, H. P. Piepho, and A. Kumar. 2012. Drought yield index to select high yielding rice lines under different drought stress severities. *Rice J.* 5: 31.
- Richards, R. A. 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agric. Water Manage.* 80: 197-211.
- Rosielle, A. A., and J. Hamblin. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non stress environments. *Crop Sci.* 21: 943-946.
- Saint Pierre, C., J. L. Crossa. D. Bonnett, K. Yamaguchi-Shinozaki, and P.M. Reynolds. 2012. Phenotyping transgenic wheat for drought resistance. *J. Exp. Bot.* 63: 1799-1808.
- Sarwar, N., M. Maqsood, K. Mubeen, M. Shehzad, M. S. Bhullar, R. Qamar, and N. Akbar. 2010. Effect of different levels of irrigation on yield and yield components of wheat cultivars. *Pak. J. Agri. Sci.* 47: 371-374.
- Semenov, M. A., P. Stratonovitch, F. Alghabari, and M. J. Gooding. 2014. Adapting wheat in Europe for climate change. *J. Cereal Sci.* 59: 245-256.
- Simane, B., P. C. Struik, M. M. Nachit, and J. M. Peacock. 1993. Ontogenetic analysis of yield components and yield stability of durum wheat in water-limited environments. *Euphytica* 71: 211-219.
- Slafer, G. A., R. Savin, and V. O. Sadras. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crop Res.* 157: 71-83.
- Zaied, C., N. Zouaoui, H. Bacha, and S. Abid. 2012. Natural occurrence of zearalenone in Tunisian wheat grains. *Food Control* 25: 773-777.
- Wang, J., C. Xu, S. Gao, and P. Wang. 2013. Effect of water amounts applied with drip irrigation on water consumption characteristics and yield of spring wheat in Xinjiang. *Adv. J. Food Sci. Technol.* 5: 1180-1185.