

RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES, Y DENSIDAD DE RAÍCES EN ARROZ BAJO RIEGO Y SECANO

GRAIN YIELD AND ITS COMPONENTS, AND ROOT DENSITY IN RICE UNDER IRRIGATION AND RAINFED CONDITIONS

Mónica B. López-Hernández¹, Cándido López-Castañeda^{1*}, Josué Kohashi-Shibata¹,
Salvador Miranda-Colín¹, Edwin J. Barrios-Gómez², Carlos G. Martínez-Rueda³

¹Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México.

²Campo Experimental Zacatepec, INIFAP, Zacatepec, Morelos, México. ³Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, El Cerillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México 50090. (clc@colpos.mx)

RESUMEN

En México, el arroz (*Oryza sativa* L.) se cultiva en riego y secano con restricciones de humedad y periodos frecuentes de sequía durante el ciclo. El rendimiento de grano (RG) se reduce severamente cuando la sequía coincide con la floración y el periodo de llenado del grano. El objetivo de este estudio fue evaluar el RG y sus componentes, y la densidad de raíces (DR) en ocho líneas F_6 de arroz y un testigo (la variedad nacional El Silverio), en condiciones de riego (R) y secano (S) en Zacatepec, Morelos, México. Las líneas provienen de los viveros del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR; Santa Rosa, Cali, Colombia). La siembra se hizo el 10 de junio de 2013, con una densidad de siembra de 100 kg ha^{-1} y dosis de fertilización de 180-40-40 de N-P-K. El RG y el número de granos m^{-2} (G M^{-2}) fueron las características más afectadas por el déficit hídrico en S. La DR en R (74 %) y S (72 %) fue mayor en el estrato de 0-30 cm; la DR en S (0.45, 0.26, 0.18 y 0.10 cm cm^{-3}) fue mayor que en R (0.26, 0.16, 0.10 y 0.05 cm cm^{-3}) en todos los estratos del suelo. Las líneas 2 y 7 fueron las más productivas en R y S, y mostraron alta biomasa aérea (BM), índice de cosecha (IC) y G M^{-2} . La línea 2, además, mostró mayor DR que las otras líneas en los estratos de 15-30, 30-50 y 50-70 cm en R y S. El testigo mostró menor RG y sus componentes, y densidad de raíces que los otros genotipos. El RG se relacionó positivamente con sus componentes en promedio de R y S. Las líneas más productivas podrían utilizarse comercialmente y como progenitores en los programas de mejoramiento del rendimiento de grano de arroz para áreas de riego y secano.

ABSTRACT

In Mexico, rice (*Oryza sativa* L.) is cultivated under irrigation and rainfed conditions with moisture restrictions and frequent periods of drought during the growing season. Grain yield (GY) is reduced severely when drought coincides with flowering and the grain-filling period. The objective of this study was to evaluate the GY and its components, and the root density (RD) in eight F_6 lines of rice and one control (the national variety El Silverio), under irrigation (I) and rainfed (R) conditions in Zacatepec, Morelos, Mexico. The lines come from the nurseries of the Latin American Fund for Irrigation Rice (FLAR, for its acronym in Spanish; Santa Rosa, Cali, Colombia). The experiment was sown on June 10, 2013, with a seeding rate of 100 kg ha^{-1} and a fertilization rate of 180-40-40 of N-P-K. GY and the number of grains m^{-2} (G M^{-2}) were the characteristics most affected by the water deficit in R. The RD in I (74 %) and R (72 %) was higher in the stratum of 0-30 cm; the RD in R (0.45, 0.26, 0.18 and 0.10 cm cm^{-3}) was higher than in I (0.26, 0.16, 0.10 and 0.05 cm cm^{-3}) in every stratum of the soil. Lines 2 and 7 were the most productive in I and R, and showed high aerial biomass (BM), harvest index (HI) and G M^{-2} . Line 2; in addition, showed higher RD than the other lines in the strata of 15-30, 30-50 and 50-70 cm in I and R. The control showed lower GY and its components, and RD than the other genotypes. GY was positively related to its components in average of I and R. The most productive lines could be used commercially and as parents in a rice breeding program for irrigation and rainfed areas.

Key words: aerial biomass, root density, water deficit, harvest index, genotype x environment interaction, grain yield.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2016. Aprobado: marzo, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en Agrocencia 52: 563-580. 2018.

Palabras clave: biomasa aérea, densidad de raíces, déficit hídrico, índice de cosecha, interacción genotipo x ambiente, rendimiento de grano.

INTRODUCCIÓN

En México, el arroz se cultiva en un área aproximada de 42,310 ha con un rendimiento de grano promedio nacional de 6.3 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017). El 75 % de esta superficie se cultiva en condiciones de riego o inundación permanente durante el ciclo, con un rendimiento medio de 6.2 Mg ha⁻¹ y el 25 % restante se cultiva bajo condiciones de secano con rendimientos promedio de 4.4 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017). En el país se distinguen tres zonas agroclimáticas para el cultivo del arroz: trópico húmedo, trópico subhúmedo y trópico seco. Cada zona tiene diferentes problemáticas agronómicas y de producción, entre las que destacan la restricción en el abastecimiento de agua para riego; irregularidad pluvial con frecuentes periodos de sequía intermitente intra-estival o terminal o ambos; inundaciones provocadas por huracanes; estrés por altas temperaturas; factores bióticos como malezas, plagas y enfermedades; deficiencias o toxicidad nutricional y altos costos de producción (García *et al.*, 2011; Barrios-Gómez *et al.*, 2016). El estado de Morelos es una de las zonas de trópico seco que destaca por altos rendimientos de grano bajo riego, con un promedio de 10.2 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017) lo que se debe, presumiblemente, a la utilización de variedades con mayor densidad del grano y mayor número de panículas por unidad de área en siembra directa en las zonas 'alta' (1000 a 1400 msnm) y 'baja' (800 a 1000 msnm) (Salcedo y Barrios, 2013).

El arroz requiere un alto volumen de agua a lo largo de su ciclo biológico y es el único cereal comercial que se cultiva en suelos saturados de agua (en algunos sistemas, las plantas se mantienen sumergidas) durante una parte o la totalidad del ciclo biológico; por esta razón, el suministro adecuado de agua es el factor más importante en la producción (Chatel *et al.*, 2010). Pero hay áreas de cultivo donde la producción del grano depende, en gran medida, de la lluvia durante el ciclo; en estas condiciones, las plantas pueden experimentar periodos de estrés hídrico, además del estrés causado por otros factores bióticos y abióticos que reducen considerablemente el rendimiento y la calidad del grano (Miranda-Domínguez *et al.*,

INTRODUCTION

In Mexico, rice is cultivated in an approximate area of 42,310 ha with an average domestic grain yield of 6.3 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017). Of this surface, 75 % is cultivated under conditions of irrigation or permanent flooding during the cycle, with a mean yield of 6.2 Mg ha⁻¹ and the remaining 25 % is cultivated under rainfed conditions with average yields of 4.4 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017). Three agroclimate zones for rice cultivation are distinguished in the country: humid tropics, sub-humid tropics, and dry tropics. Each zone has different agronomic and production problems, among which the following stand out: restriction in water supply for irrigation; rain irregularity with frequent intermittent periods of intra-summer, terminal drought, or both; flooding provoked by hurricanes; stress due to high temperatures; biotic factors such as weeds, pests and diseases; deficiencies or nutritional toxicity; and high production costs (García *et al.*, 2011; Barrios-Gómez *et al.*, 2016). The state of Morelos is one of the zones in the dry tropics that stands out because of high grain yields under irrigation, with an average of 10.2 Mg ha⁻¹ (SAGARPA, 2017), which is due, presumably, to the use of varieties with higher grain density and higher number of panicles per unit of area with direct sowing in the 'high' (1000 to 1400 masl) and 'low' (800 to 1000 masl) zones (Salcedo and Barrios, 2013).

Rice requires a high volume of water throughout its biological cycle and it is the only commercial cereal that is cultivated in soils saturated with water (in some systems, the plants remain submerged) during a part or all of the biological cycle; therefore, the adequate supply of water is the most important factor for crop production (Chatel *et al.*, 2010). However, there are cultivation areas where grain production depends, to a great measure, on the rain during the cycle; in these conditions, the plants can experience periods of water stress, in addition to the stress caused by other biotic and abiotic factors that considerably reduce the yield and quality of the grain (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016). The water deficit, in and of itself, is the abiotic factor with the highest impact on the rainfed rice yield by affecting morphological (number of panicles and spikelets per panicle; plant height; aerial biomass; number of tillers, roots and

2016). El déficit hídrico, por sí mismo, es el factor abiótico con mayor impacto en el rendimiento del arroz de secano al afectar características morfológicas (número de panículas y de espiguillas por panícula; altura de planta; biomasa aérea; número de macollos, raíces y hojas), fisiológicas (fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, eficiencia en el uso del agua, contenido relativo de agua, contenido de clorofila, actividad del fotosistema II, estabilidad de la membrana, discriminación isotópica de carbono y contenido de ácido abscísico), bioquímicas (acumulación de prolina, azúcares, poliaminas y antioxidantes) y genómicas (expresión de genes que codifican para factores de transcripción y proteínas de defensa) de las plantas (Shah, *et al.*, 2011; Pandey y Shukla, 2015; Khondia *et al.*, 2015).

La raíz percibe el déficit hídrico edáfico, su función clave es la absorción de agua y nutrientes del suelo, y es un componente significativo de la adaptación de la planta en ambientes con limitaciones de humedad. La obtención de nuevas variedades con caracteres mejorados del crecimiento de la raíz para la adquisición de agua en suelos en proceso de secamiento, podría tener un impacto significativo en la seguridad alimentaria nacional y global (Lynch *et al.*, 2014). En estas condiciones, el rendimiento de grano podría mejorarse identificando en la planta los factores genéticos y fisiológicos que determinan mayor acumulación de biomasa y asignación de materia seca al grano, i.e. la proporción de materia seca acumulada en el grano con respecto a la biomasa total o índice de cosecha (Passioura y Angus, 2010). La acumulación alta de biomasa en la planta y alto índice de cosecha podrían reducir el efecto negativo del déficit hídrico del suelo durante la floración y el llenado del grano. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta, con base en el rendimiento de grano y sus componentes, y la densidad de raíces en condiciones de campo bajo riego y secano durante las etapas fenológicas de floración y de llenado del grano en germoplasma de arroz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Un experimento se estableció en el Campo Agrícola Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Zacatepec, Morelos, México (18° 39' N, 99° 12' O y 900 msnm) durante el ciclo primavera-

leaves), physiological (photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, efficiency in water use, relative water content, chlorophyll content, activity of the photosystem II, stability of the membrane, isotopic discrimination of carbon, and content of abscisic acid), biochemical (accumulation of proline, sugars, polyamines and antioxidants), and genomic (expression of genes that codify for transcription factors and defense proteins) characteristics of the plants (Shah, *et al.*, 2011; Pandey and Shukla, 2015; Khondia *et al.*, 2015).

The root perceives the soil water deficit, its key function is the absorption of water and soil nutrients, and it is a significant component of the adaptation of the plant in environments with moisture limitations. Obtaining new varieties with improved traits from root growth for water acquisition in soils in the process of drying could have a significant impact on the national and global food security (Lynch *et al.*, 2014). Under these conditions, the grain yield could be improved by identifying in the plant the genetic and physiological factors that determine a higher biomass accumulation and partition of dry matter to the grain, i.e. the proportion of dry matter accumulated in the grain with regards to the total biomass or harvest index (Passioura and Angus, 2010). The high biomass accumulation in the plant and high harvest index could reduce the negative effect of the water deficit in the soil during flowering and grain filling. Therefore, the objective of this study was to evaluate the response of a group of rice genotypes, based on the grain yield and its components, and the root density, in field conditions under irrigation and rainfed during the phenologic stages of flowering and grain filling.

MATERIALS AND METHODS

Experimental site

An experiment was established in the Experiment Agricultural Station of the National Institute of Forest, Agricultural and Livestock Research (*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*, INIFAP) in Zacatepec, Morelos, Mexico (18° 39' N, 99° 12' W and 900 masl) during the 2013 spring-summer cycle. The locality has a warm sub-humid climate with summer rains (Awo (w)), mean annual precipitation of 839 mm, and mean annual temperature of 24.8 °C; the highest

verano de 2013. La localidad tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Awo (w)), una precipitación media anual de 839 mm, y temperatura media anual de 24.8 °C; la mayor proporción de la lluvia ocurre de mayo a octubre, con un periodo de sequía 'intra-estival' o 'canícula' en julio (García, 2004). El suelo tiene textura arcillosa y con mayores valores de capacidad de campo (CC) 54.8 %, del punto de marchitez permanente (PMP) 32.2 %, pH (7.6), conductividad eléctrica (CE=0.59 dS m⁻¹) y contenidos de materia orgánica (MO=2.2 %), nitrógeno (N=0.11 %), fósforo (P=14.3 ppm) y potasio (K=0.29 ppm) en el estrato de 0-20 cm comparados con los observados en el estrato de 20-40 cm (CC=53 %, PMP=31.2 %, pH=7.5, CE=0.45 dS m⁻¹, MO=1 %, N=0.07 %, P=5.1 ppm y K=0.15 ppm); la densidad aparente (1.9 g cm⁻³) fue mayor en el estrato de 20-40 cm que en el estrato de 0-20 cm (1.85 g cm⁻³) (Laboratorio de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México).

Material genético

El germoplasma evaluado incluyó ocho líneas F₆ de arroz con características de alto rendimiento y resistencia a *Tagosodes oryzae* y *Pyricularia oryzae*; así como con calidad de grano superior definida por su contenido de amilosa, apariencia del grano procesado, alta recuperación de granos enteros y tolerancia al retraso en cosecha (Chatel *et al.*, 2010). Las líneas proceden de los viveros del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR; Santa Rosa, Cali, Colombia; Cuadro 1). El material genético se preseleccionó por rendimiento de grano en ambientes de trópico húmedo, subhúmedo y seco en el ciclo primavera-verano (P-V) de 2012 en Palizada, Campeche; Zacatepec, Morelos; Cárdenas,

proportion of rain happens from May to October, with an 'intra-summer' or 'midsummer' drought period in July (García, 2004). The soil has clay texture with higher values of field capacity (FC) 54.8 %, of permanent wilting point (PWP) 32.2 %, pH (7.6), electric conductivity (EC=0.59 dS m⁻¹) and organic matter (OM=2.2 %), nitrogen (N=0.11 %), phosphorus (P=14.3 ppm) and potassium (K=0.29 ppm) contents in the 0-20 cm stratum, compared to those observed in the 20-40 cm stratum (FC=53 %, PWP=31.2 %, pH=7.5, EC=0.45 dS m⁻¹, OM=1 %, N=0.07 %, P=5.1 ppm and K=0.15 ppm); the apparent density (1.9 g cm⁻³) was higher in the 20-40 cm stratum than in the 0-20 cm stratum (1.85 g cm⁻³) (Laboratorio de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México).

Genetic material

The germplasm evaluated included eight F₆ lines of rice with characteristics of high yield and resistance to *Tagosodes oryzae* and *Pyricularia oryzae*; as well as, with higher grain quality defined by its content of amylose, appearance of the processed grain, high recovery of full grains, and tolerance to harvest delay (Chatel *et al.*, 2010). The lines come from the nurseries of the Latin American Fund for Irrigation Rice (*Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego*, FLAR; Santa Rosa, Cali, Colombia; Table 1). The genetic material was preselected based on the grain yield in humid tropics, sub-humid and dry environments in the 2012 spring-summer cycle (S-S) in Palizada, Campeche; Zacatepec, Morelos; Cárdenas, Tabasco; and Tecmán, Colima, Mexico. The control was the commercial variety El Silverio from Oaxaca, Mexico (Table 1).

Cuadro 1. Material genético utilizado en el experimento de campo.

Table 1. Genetic material used in the field experiment.

No. de genotipo	Genealogía	Origen	Rendimiento de grano [†] (t ha ⁻¹)	Días a antesis [‡]	Resistencia genética [‡]
1	FL04621-2P-1-3P-3P-M	P-V 2005	6.8	85	<i>T. oryzae</i> y <i>P. oryzae</i>
2	FL05392-3P-12-2P-2P-M	P-V 2006	13.2	90	"
3	FL06747-4P-10-5P-3P-M	P-V 2007	10.5	89	"
4	FL07201-6P-5-3P-3P-M	P-V 2008	9.4	84	"
5	FL08224-3P-2-1P-2P-M	P-V 2009	10.9	90	"
6	FL08378-3P-5-2P-2P-M	P-V 2009	11.4	87	"
7	FL08224-3P-2-1P-3P-M	P-V 2009	15.9	92	"
8	FL10129-12P-4-2P-3P-M	P-V 2011	12.1	88	"
9	El Silverio (Testigo)	P-V 2011	12.0	91	<i>P. oryzae</i>

[†]Datos proporcionados por el M.C. Leonardo Hernández Aragón, Líder Nacional del Programa de Arroz, INIFAP, Zacatepec, Morelos.

[‡]Data provided by the M.Sc. Leonardo Hernández Aragón, National Leader of the Rice Program, INIFAP, Zacatepec, Morelos.

Tabasco y Tecomán, Colima, México. El testigo fue la variedad comercial El Silverio de Oaxaca, México (Cuadro 1).

Tratamientos y diseño experimental

El experimento consistió en dos tratamientos de humedad edáfica: 1) riego por inundación (con la aplicación de agua por gravedad cada semana desde la siembra hasta la madurez fisiológica y mantener el suelo inundado permanentemente) y 2) secano, donde el riego se suspendió a los 26 d después de la siembra (dds) hasta la madurez fisiológica. Los tratamientos se aleatorizaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones en cada condición de humedad y la unidad experimental fue seis surcos de 5 m de largo separados a 0.2 m. La siembra se hizo en forma directa en suelo seco a chorrillo el 10 de junio de 2013, con una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹ y dosis de fertilización de 180-40-40, empleando urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente. Un tercio del N y todo el P y K se aplicaron a la siembra; el segundo tercio del N se aplicó al iniciar el amacollamiento (25 dds); el último tercio se aplicó durante el 'embuche' (70 dds).

Las malezas se controlaron con dos aplicaciones de herbicida; la primera en preemergencia, 3 d después del riego de siembra (Ronstar®, 2 L ha⁻¹); la segunda a los 21 dds (Propanil® + 2,4-D diclorofenoxiacético® a una dosis de 6.0 y 1.5 L ha⁻¹, respectivamente). El control de *Rupela albinella*, *Spodoptera frugiperda* Smith y *Oebalus insularis*, se realizó al aplicar Cipermetrina® a razón de 0.25 L ha⁻¹, a los 66 y 90 dds.

Datos meteorológicos

Los datos de temperatura máxima y mínima del aire, así como la precipitación acumulada cada 10 d, se obtuvieron de una estación meteorológica localizada a 50 m de distancia del experimento, dentro del Campo Experimental del INIFAP en Zacatepec, Morelos.

Contenido hídrico del suelo

El contenido de humedad aprovechable (HA, %) del suelo se determinó sólo en el tratamiento de secano cada 10 d en los estratos 0-20 y 20-40 cm desde la emergencia de las plántulas hasta la madurez fisiológica, de acuerdo con el método gravimétrico [% (HA)=(peso de suelo húmedo - peso de suelo seco/peso de suelo seco) 100].

Variables medidas

La biomasa aérea (BM, g m⁻²), el rendimiento de grano (RG, g m⁻²), el índice de cosecha (IC=RG/BM), el número de panículas

Treatments and experimental design

The experiment had two treatments of soil moisture: 1) flood irrigation (with the application of water by gravity each week since sowing until physiological maturity and maintaining the soil permanently flooded), and 2) rainfed, where irrigation was suspended 26 d after sowing (das) until physiological maturity. The treatments were randomized in an experimental design of complete random blocks with three replicates in each condition of soil moisture and the experimental unit was six furrows of 5 m long separated by 0.2 m. The sowing was made directly on dry soil by runs on June 10, 2013, with a seeding rate of 100 kg ha⁻¹ and fertilization of 180-40-40, using urea, triple calcium superphosphate and potassium chloride, respectively. A third part of the N and all of the P and K were applied to the sowing; the second third of the N was applied at the beginning of tillering (25 das); the last third was at the booting stage (70 das).

The weeds were controlled with two applications of herbicides; the first at pre-emergence, 3 d after the sowing irrigation (Ronstar®, 2 L ha⁻¹); the second at 21 das (Propanil® + 2,4-D dichlorophenoxyacetic® at a dose of 6.0 and 1.5 L ha⁻¹, respectively). The control of *Rupela albinella*, *Spodoptera frugiperda* Smith and *Oebalus insularis* was performed when applying Cypermethrin® at a rate of 0.25 L ha⁻¹, at 66 and 90 das.

Meteorological data

The data of maximum and minimum air temperature, as well as the accumulated precipitation every 10 d, were obtained from a meteorological station located 50 m from the experiment, inside the INIFAP Experiment Field Station in Zacatepec, Morelos.

Soil water content

The available moisture content (HA, %) of the soil was determined only in the rainfed treatment every 10 d in the strata of 0-20 and 20-40 cm since the emergence of the seedlings until physiological maturity, according to the gravimetric method [% (HA)=(weight of humid soil—weight of dry soil/weight of dry soil) 100].

Measured variables

The aerial biomass (BM, g m⁻²), grain yield (GY, g m⁻²), harvest index (HI=GY/BM), number of panicles m⁻² (P M⁻²), number of grains per panicles (GP), number of grains m⁻² (G M⁻²) and thousand grains weight (TGW, g) were evaluated at harvest.

m^{-2} (P M^{-2}), el número de granos por panícula (GP), el número de granos m^{-2} (G M^{-2}) y el peso de mil granos (PMG, g) se evaluaron a la cosecha.

La densidad de raíces (DR, cm cm^{-3}) se calculó a partir de muestras de suelo de todas las parcelas del experimento. Cuatro muestras de suelo se extrajeron de cada parcela con una barrena del tipo Veihmeyer con boquilla de 2.1 cm de diámetro en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm; dos sobre la línea de plantas y dos entre líneas de plantas. En las muestras de suelo completamente secas se separaron los fragmentos de raíz con unas pinzas de depilar en cada muestra y se colocaron en viales de plástico con 50 mL de agua destilada. La densidad de raíces (cm raíz cm^{-3} suelo) se estimó de acuerdo con el método descrito por Tennant (1975) y López-Castañeda y Richards (1994).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante el ANDEVA para todas las variables medidas con el programa SAS versión 9.1 para Windows (SAS, 2009) en forma individual para cada tratamiento de humedad edáfica y en forma combinada, para determinar la significancia de la interacción genotipo x ambiente. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey (DMSH, $p \leq 0.05$). Adicionalmente, se realizó un análisis multivariado de componentes principales del rendimiento de grano versus los componentes del rendimiento y la densidad de raíces, para los datos obtenidos en riego y secano (STATGRAPHICS, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación, temperatura y humedad edáfica

La lluvia acumulada en el curso del experimento ascendió a 645 mm, distribuidos irregularmente durante el mismo. La lluvia se redujo considerablemente desde 50 a 60 dds (fin de la fase vegetativa), 80 a 90 dds (emergencia de la panícula) y 110 a 140 dds (anthesis y llenado de grano) (Figura 1A). La lluvia registrada fue inferior al requerimiento mínimo de humedad (>800 mm) establecido en las zonas productoras de arroz más aptas de Morelos, con rendimientos potenciales de 9.8 a 17.1 t ha^{-1} (Osuna, 2000). El estrés por sequía durante el crecimiento vegetativo, en especial en la fase inicial, la floración y períodos terminales, puede interrumpir la iniciación floral causando esterilidad de la espiguilla y deficiencias en el llenado del grano, lo que resulta en menor peso del grano y reducción en el rendimiento del arroz (Kamoshita *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2014).

The root density (RD, cm cm^{-3}) was calculated from soil samples from all the experimental plots. Four soil samples were extracted from each plot with a Veihmeyer-type borer with a nozzle of 2.1 cm diameter in the 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm strata; two on the line of plants and two between lines of plants. When the soil samples had completely dried, root fragments were separated with tweezers from each sample and placed in plastic vials with 50 mL of distilled water. Then, root density (cm root cm^{-3} soil) was estimated according to the method outlined by Tennant (1975) and López-Castañeda and Richards (1994).

Statistical analysis

The data were analyzed through ANOVA for all the variables with SAS software version 9.1 for Windows (SAS, 2009), individually for each treatment of soil moisture and combined, to determine the significance of the genotype x environment interaction. Means comparison was carried out with Tukey test (DMSH, $p \leq 0.05$). Additionally, a multivariate analysis of principal components of grain yield versus yield components and root density was carried out, for the data obtained in irrigation and rainfed conditions (STATGRAPHICS, 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

Precipitation, temperature and soil moisture

The amount of rainfall accumulated during the experiment reached 645 mm, with an irregular distribution. The rain was reduced considerably from 50 to 60 das (end of the vegetative phase), 80 to 90 das (emergence of the panicle) and 110 to 140 das (anthesis and grain filling) (Figure 1a). The rain recorded was lower than the minimum moisture requirement (>800 mm) established in the most apt rice-producing zones in Morelos, with potential yields of 9.8 to 17.1 t ha^{-1} (Osuna, 2000). The water stress from drought during the vegetative growth, mostly in the initial phase, the flowering and terminal periods, can interrupt the floral initiation causing sterility of the spikelets and deficiencies in the grain filling, which results in lower grain weight and reduction in rice yield (Kamoshita *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2014).

The maximum and minimum air temperatures showed low variation with averages of 17 and 33 °C, respectively (Figure 1A); these values are between the minimum (13.5 °C) and maximum (35.4 °C) temperatures favorable for processes of

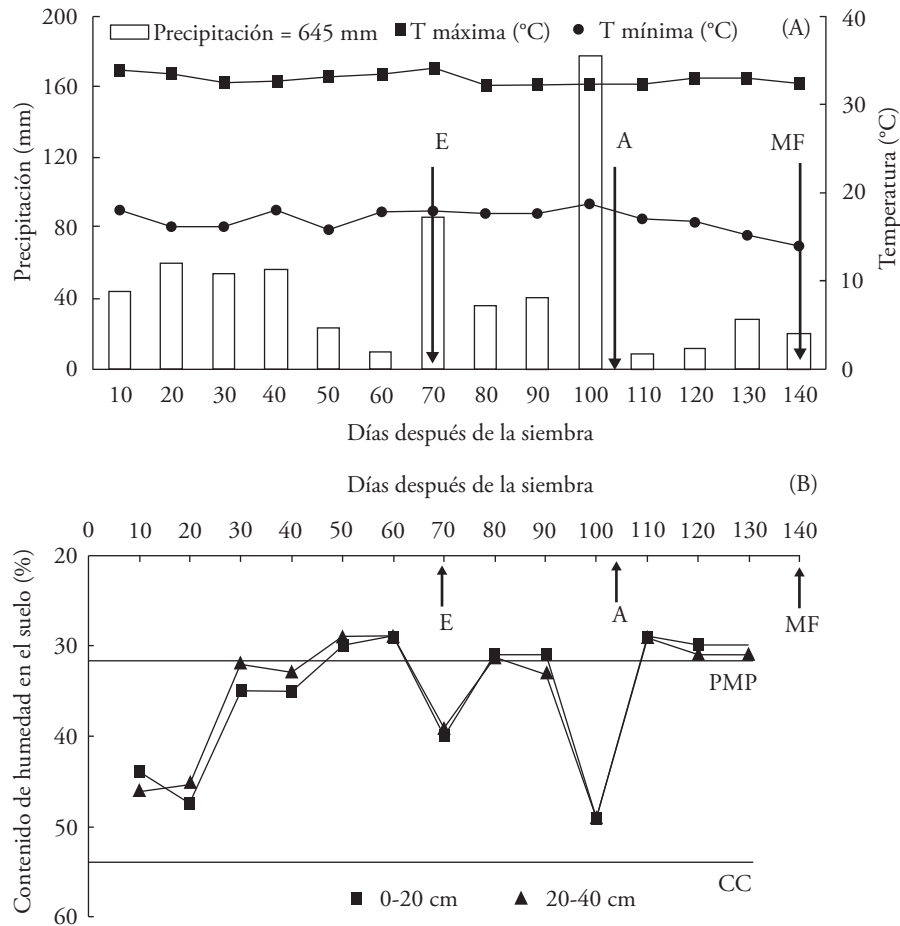


Figura 1. Promedio de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada (A) y contenido de humedad del suelo en los estratos de 0-20 y 20-40 cm en el tratamiento de secano (B), determinados cada 10 d durante el experimento en el ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos. PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente; CC=Capacidad de campo. Promedio del número de días a embudo (E), anthesis (A) y madurez fisiológica.

Figure 1. Average of maximum and minimum air temperatures, and accumulated precipitation (A) and soil moisture content in the 0-20 and 20-40 cm strata in the rainfed treatment (R), determined every 10 d during the experiment in the 2013 spring-summer cycle. Zacatepec, Morelos. PWP=Permanent wilting percentage; FC=Field capacity. Average number of days to booting (B), anthesis (A) and physiological maturity (PM).

Las temperaturas máxima y mínima del aire mostraron poca variación con promedios de 17 y 33 °C, respectivamente (Figura 1A); estos valores se ubican entre las temperaturas mínima (13.5 °C) y máxima (35.4 °C) favorables para los procesos de germinación de las semillas, iniciación foliar, crecimiento de la raíz y órganos aéreos de la planta e iniciación de la panícula (Sánchez *et al.*, 2014). Los valores de temperaturas también fueron favorables para la floración, fertilidad de las espiguillas y rendimiento de grano (Jagadish *et al.*, 2015). Las temperaturas mayores a 35 °C causan esterilidad en las espiguillas al afectar la emergencia de la panícula (Cho y Oki, 2012).

seed germination, foliar initiation, root growth, and aerial organs of the plant and initiation of the panicle (Sánchez *et al.*, 2014). The temperature values were also favorable for flowering, fertility of the spikelets, and grain yield (Jagadish *et al.*, 2015). Temperatures higher than 35 °C cause sterility in the spikelets by affecting the emergence of the panicle (Cho and Oki, 2012).

In the experimental plot with irrigation treatment, the soil remained flooded during the biological cycle of the plants (data not shown). In contrast, the rainfed treatment exhibited availability of soil moisture that varied with the amount and

En la parcela experimental con tratamiento de riego el suelo permaneció inundado durante el ciclo biológico de las plantas (datos no mostrados). En contraste, el tratamiento de secano exhibió, disponibilidad de humedad edáfica que varió con la cantidad y distribución de la lluvia, se registraron periodos de sequía con contenidos hídricos del suelo inferiores al PMP, el primero al final de la fase vegetativa (50-60 dds), luego durante la emergencia de la panícula (80 a 90 dds) y, por último, durante la antesis y el llenado del grano (110-140 dds) (Figura 1B). El mayor déficit hídrico se observó en el estrato de 0-20 cm, donde se concentra más del 50 % de la masa de raíces (López-Castañeda y Richards, 1994).

Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en condiciones de riego

En condiciones de riego la variabilidad entre genotipos en cuanto a RG y sus componentes fue amplia. El RG, la BM, el IC, $P\ M^{-2}$, $G\ M^{-2}$, PMG y GP variaron de 800 a 1606, de 1015 a 1425, de 43 a 53, de 125 a 257, de 15422 a 45538, de 28 a 37 y de 123 a 187, respectivamente; la mayor variación se observó en el rendimiento de grano y el número de granos m^{-2} (Cuadro 2). Las líneas 2 y 7 produjeron el mayor RG acompañado de los más altos valores BM, IC, $G\ M^{-2}$, $P\ M^{-2}$, PMG y GP (Cuadro 2). El rendimiento de grano y sus componentes en el testigo fueron inferiores a los registrados para las líneas experimentales. El alto rendimiento de grano de las líneas 2 y 7 confirmó el comportamiento sobresaliente mostrado los ciclos de preselección (Cuadro 1). El rendimiento de grano de las líneas 2 y 7 fue 44 % mayor al rendimiento obtenido con las dos mejores líneas experimentales de arroz en promedio de tres ambientes (Nayarit, Michoacán y San Luis Potosí) en México (Barrios *et al.*, 2016). Las diferencias en rendimiento de grano podrían deberse al mayor potencial genético de rendimiento y resistencia a enfermedades en el germoplasma empleado aquí, que el estudiado por Barrios *et al.* (2016); así como la alta habilidad de amacollamiento, grano grande alargado y estabilidad del rendimiento en todos los ambientes (Salcedo y Barrios, 2013).

El rango de variación genética para densidad de raíces fue de 0.22 a 0.29, 0.15 a 0.22, 0.08 a 0.12 y 0.4 a 0.9 $cm\ cm^{-3}$, en los estratos: 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm de profundidad, respectivamente;

distribución de rainfall, drought periods were found with soil water contents under PWP, the first at the end of the vegetative phase (50-60 das), then during the emergence of the panicle (80 to 90 das), and lastly, during anthesis and grain filling (110-140 das) (Figure 1B). The highest water deficit was observed in the 0-20 cm stratum, where more than 50 % of the root mass is concentrated (López-Castañeda and Richards, 1994).

Grain yield, yield components and root density under irrigation conditions

Under irrigation conditions, the variability between genotypes in terms of GY and its components was broad. GY, BM, HI, $P\ M^{-2}$, $G\ M^{-2}$, TGW and GP varied from 800 to 1606, from 1015 to 1425, from 43 to 53, from 125 to 257, from 15422 to 45538, from 28 to 37 and from 123 to 187, respectively; the widest variation was observed in grain yield and number of grains m^{-2} (Table 2). Lines 2 and 7 produced the highest GY accompanied by the highest values of BM, HI, $G\ M^{-2}$, $P\ M^{-2}$, TGW and GP (Table 2). The grain yield and its components in the control were lower than those found for the inbred lines. The high grain yield of lines 2 and 7 confirmed the outstanding behavior shown by the preselection cycles (Table 1). The grain yield of lines 2 and 7 was 44 % higher than the yield obtained with the two best experimental rice lines in average from three environments (Nayarit, Michoacán and San Luis Potosí) in Mexico (Barrios *et al.*, 2016). The differences in grain yield could be due to the higher genetic potential for yield and resistance to diseases in the germplasm used here, than the one studied by Barrios *et al.* (2016); as well as the high ability of tillering, elongated large grain, and stability of the yield in all the environments (Salcedo and Barrios, 2013).

The range of genetic variation for root density was 0.22 to 0.29, 0.15 to 0.22, 0.08 to 0.12 and 0.4 to 0.9 $cm\ cm^{-3}$, in the strata: 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm, respectively; lines 2, 3, 6, 4, 1 and 9 (control); 7, 5 and 1; 7, 3, 6, 1, 8 and 9 (control); and line 2 showed the highest root density in the strata of 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm, respectively. The control line only had high root density in the strata of 0-15 and 30-50 cm (Table 3). In addition, it was determined that line 2 had higher root density

Cuadro 2. Rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.
Table 2. Grain yield and yield components, and root density in different strata of the soil under irrigation conditions. 2013 spring-summer cycle. Zacatepec, Morelos, Mexico.

No. de genotipo	RG [‡] (g m ⁻²)	BM [‡] (g m ⁻²)	IC [‡] (%)	P M ^{-2‡}	G M ^{-2‡}	PMG [‡] (g)	GP [‡]	Densidad de raíces (cm cm ⁻³)			
								0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
2	1606a	1425ab	51a	257a	45538a	37a	177b	0.28a	0.17bc	0.09b	0.09a
7	1590a	1425ab	53a	227b	42458a	33b	187a	0.22c	0.19ab	0.10ab	0.05b
3	1364b	1165b	52a	143c	18902de	31bc	132de	0.29a	0.16bc	0.12a	0.04b
6	1330b	1250bc	51a	143c	22061cd	32b	155c	0.29a	0.15bc	0.09ab	0.05b
5	1300b	1254bc	51a	142c	22682c	31bc	160c	0.23bc	0.22a	0.08b	0.04b
4	1207c	1172cd	51a	130c	16871ef	29cd	130def	0.27ab	0.14c	0.09ab	0.06b
1	972d	1015d	49b	125c	15422f	28d	123f	0.28a	0.18ab	0.09ab	0.05b
8	890e	1119cd	45b	230b	31864b	28d	139d	0.25abc	0.16bc	0.10ab	0.04b
9(Testigo)	800f	1192cd	43b	131c	16503ef	28d	126ef	0.28a	0.15bc	0.11a	0.05b
Media general	1229	1247	50	170	25811	31	148	0.26	0.16	0.10	0.05

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05). [‡]Ver Materiales y Métodos. ♦ Means with different letter in a line are statistically different (Tukey, p ≤ 0.05). [‡]See Materials and Methods.

las líneas 2, 3, 6, 4, 1 y 9 (testigo); 7, 5 y 1; 7, 3, 6, 1, 8 y 9 (testigo); y la línea 2 mostraron la mayor densidad de raíces en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, respectivamente. La línea testigo sólo tuvo alta densidad de raíces en los estratos de 0-15 y 30-50 cm (Cuadro 3). Además, se determinó que la línea 2 tuvo mayor densidad de raíces en los estratos de 0 a 70 cm, lo que podría ser ventajoso para una mayor captura de agua y nutrientes del suelo. Ahmadi *et al.* (2014) indicaron que el sistema de raíces tiene una función crucial en la extracción de agua y nutrientes a través del complejo que forman con las propiedades biogeoquímicas del suelo y de mantener estas funciones bajo un amplio rango de escenarios de estrés, para asegurar la sobrevivencia de la planta y su reproducción; esta función es aún más importante debido a la creciente inestabilidad del clima y las limitaciones en el uso de fertilizantes y riego en los sistemas de cultivo.

Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en condiciones de secano

En condiciones de secano el rendimiento de grano fue afectado severamente por el déficit hídrico, obteniéndose en promedio 638 g m^{-2} vs. 1229 g m^{-2} en riego. El rango de variabilidad en el RG, BM, IC, P M^{-2} , G M^{-2} , PMG y GP fue de 203 a 980, de 924 a 1433, de 30 a 42, de 92 a 129, de 8290 a 15131, de 21 a 26 y de 90 a 118, respectivamente. La BM y el IC mostraron un rango de variación más amplio en sequía (BM=924 a 1433 e IC=30 a 42) que en riego (BM=1015 a 1425 e IC=43 a 53); el RG y G M^{-2} fueron los componentes con mayor variación genética. Las líneas 2 y 7 produjeron el mayor RG, BM, IC y G M^{-2} ; adicionalmente, la línea 2 mostró alto número de P M^{-2} y PMG, y la línea 7 mostró alto número de GP (Cuadro 3). El IC promedio de las líneas 3, 6, 5 y 4 fue similar al de las líneas 2 y 7. El RG y todos sus componentes en el testigo fueron inferiores a las líneas experimentales. El rendimiento superior de las líneas 2 y 7 tanto en riego como en sequía, confirmó el comportamiento sobresaliente mostrado por ellas en los ciclos de preselección (Cuadros 1 y 2). Xangsayasane *et al.* (2014) obtuvieron resultados similares al estudiar el comportamiento de 227 líneas experimentales de arroz en tres tratamientos: sequía terminal, sequía intermitente y riego, y reducción del rendimiento de 34 y 59 % en los tratamientos de sequía terminal y sequía intermitente con

in the strata from 0 down to 70 cm, which could be advantageous for a higher capture of water and soil nutrients. Ahmadi *et al.* (2014) indicated that the root system has a crucial function in the extraction of water and nutrients through the complex formed with the biogeochemical properties of the soil and in maintaining these functions under a broad range of stress scenarios, to ensure the survival of the plant and its reproduction. This function is even more important due to the growing instability of the weather and the limitations in the use of fertilizers and irrigation in the cultivation systems.

Grain yield, yield components and root density under rainfed conditions

Under rainfed conditions, the grain yield was severely affected by the water deficit, and the average was 638 g m^{-2} vs. 1229 g m^{-2} under irrigation. The variability range in GY, BM, HI, P M^{-2} , G M^{-2} , TGW and GP was 203 to 980, 924 to 1433, 30 to 42, 92 to 129, 8290 to 15131, 21 to 26 and 90 to 118, respectively. BM and HI showed a broader range of variation in drought (BM=924 to 1433 and HI=30 to 42), than under irrigation (BM=1015 to 1425 and HI=43 to 53); the GY and G M^{-2} were the components with the highest genetic variation. Lines 2 and 7 produced the highest GY, BM, HI and G M^{-2} ; additionally, line 2 showed a high number of P M^{-2} and TGW, and line 7 showed a high number of GP (Table 3). The average HI of lines 3, 6, 5 and 4 was similar to that of lines 2 and 7. GY and all its components in the control were lower than the experimental lines. The higher yield of lines 2 and 7 both under irrigation and in drought confirmed the outstanding behavior shown by them in the preselection cycles (Tables 1 and 2). Our results are similar to those of Xangsayasane *et al.* (2014), who studied behavior of 227 experimental rice lines in three treatments: terminal drought, intermittent drought and irrigation, and found yield reduction of 34 and 59 % in the terminal drought treatments and intermittent drought with regards to irrigation. The reduction in GY was associated with a decrease in the percentage of filled grains, HI and P M^{-2} .

The root density varied from 0.35 to 0.57, 0.22 to 0.33, 0.17 to 0.21 and 0.07 to 0.13 cm cm^{-3} in the strata of 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm, respectively; the lines 4 and 8; 2 and 1; 2 and 5; and

Cuadro 3. Rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en condiciones de secano. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.

Table 3. Grain yield and yield components, and root density in different strata of the soil under rainfed conditions. 2013 spring-summer cycle. Zacatepec, Morelos, Mexico.

No. de genotipo	RG [‡] (g m ⁻²)	BM [‡] (g m ⁻²)	IC [‡] (%)	P M ^{-2‡}	G M ^{-2‡}	PMG [‡] (g)	GP [‡]	Densidad de raíces (cm cm ⁻³) 0-15 cm 15-30 cm 30-50 cm 50-70 cm
2	939a	1433a	40ab	129a	15045a	26a	117a	0.35d 0.33a 0.21a 0.13a
7	980a	1369a	42a	128a	15131a	26a	118a	0.53abc 0.26bc 0.18bc 0.08d
3	698cb	1165b	37ab	121ab	12359b	21b	102bc	0.37bcd 0.22c 0.17c 0.09bcd
6	743b	1162b	39ab	110c	11515bc	23b	104abc	0.38bcd 0.25c 0.18bc 0.07d
5	627cd	1097bc	37b	113bc	12557b	21b	111ab	0.36cd 0.26c 0.20ab 0.08d
4	621cd	991cd	38ab	116bc	12500b	21b	108ab	0.54ab 0.24c 0.18bc 0.11abc
1	385e	924d	30c	92d	8290d	21b	90c	0.53abc 0.17c 0.09bcd
8	554d	1030bc	35b	100d	9900cd	22b	99bc	0.57a 0.18bc 0.09cd
9(Testigo)	203f	937d	18d	95d	11101bc	21b	118a	0.47abcd 0.23c 0.17c 0.13a
Media general	638	1123	35	112	12044	22	107	0.45 0.26 0.18 0.10

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05). [‡]Ver Materiales y Métodos. ♦ Means with different letter in a line are statistically different (Tukey, p≤0.05). [‡]See Materials and Methods.

respecto a riego. La reducción en el RG se asoció con una disminución en el porcentaje de granos llenos, IC y $P M^{-2}$.

La densidad de raíces varió de 0.35 a 0.57, 0.22 a 0.33, 0.17 a 0.21 y 0.07 a 0.13 $cm\ cm^{-3}$ en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, respectivamente; las líneas 4 y 8; 2 y 1; 2 y 5, y 2 y testigo tuvieron mayor densidad de raíces en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, respectivamente. El testigo mostró alta densidad de raíces sólo en el estrato de 50-70 cm (Cuadro 3). Las raíces tienen una función importante en el mantenimiento del equilibrio hídrico de la planta. En condiciones de déficit de humedad, el desequilibrio hídrico sobreviene cuando la tasa de evaporación de la planta es mayor que la tasa de absorción de las raíces (Boyer y Silk, 2004); en tales condiciones, mayores peso seco de raíz, longitud de raíz, porcentaje de raíz, número de raíces nodales, peso específico de raíces, cociente raíz/parte aérea y capacidad de ajuste osmótico se asocian, individual o conjuntamente, con la resistencia del arroz a sequía (Fageria y Moreira, 2011; Feng *et al.*, 2012; Gowda *et al.*, 2011; Henry *et al.*, 2016).

Comparación riego vs. secano

Las deficiencias hídricas del suelo afectaron diferencialmente al germoplasma con base en el RG y sus componentes y la DR en comparación con la condición de riego. El déficit hídrico en secano redujo el rendimiento y sus componentes y promovió el mayor desarrollo del sistema radical (Cuadro 4). La reducción debida al estrés hídrico fue más severa en el RG (48 %) y $G M^{-2}$ (53 %) que en los otros componentes del rendimiento, mientras que $P M^{-2}$, IC, PMG y GP

2 and control had a higher root density in the strata of 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm, respectively. Control showed high root density only in the stratum of 50-70 cm (Table 3). The roots have an important function in maintaining the water balance of the plant. Under conditions of moisture deficit, the water imbalance comes about when the rate of evaporation of the plant is higher than the rate of absorption of the roots (Boyer and Silk, 2004); under these conditions, higher dry weight of the root, root length, root percentage, number of nodal roots, specific root weight, root/shoot ratio, and capacity of osmotic adjustment are associated, individually or jointly, with the resistance of rice to drought (Fageria and Moreira, 2011; Feng *et al.*, 2012; Gowda *et al.*, 2011; Henry *et al.*, 2016).

Comparison of irrigation vs. rainfed

The water deficiencies of the soil affected differentially the germplasm based on the GY and its components, and the RD in comparison with conditions of irrigation. The water deficit under rainfed conditions reduced the yield and its components and promoted a higher development of the root system (Table 4). The reduction due to water stress was more severe in GY (48 %) and $G M^{-2}$ (53 %) than in the other yield components, while $P M^{-2}$, HI, TGW and GP decreased 34, 30, 29 and 28 %, respectively. The BM was the least affected characteristic by drought (10 %) (Table 4). In 20 lines of rice selected for their high BM and subjected to flooding and rainfed conditions in the field, most of the genotypes had good behavior under conditions of flooding and only some behaved well

Cuadro 4. Rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo de todos los genotipos en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.

Table 4. Grain yield and yield components, and root density in different strata of the soil for all genotypes in irrigation and drought conditions. 2013 spring-summer cycle. Zacatepec, Morelos, Mexico.

Tratamiento de humedad	RG [†]	BM [†]	IC [†]	$P M^{-2}$ [†]	$G M^{-2}$ [†]	PMG [†]	GP [†]	Densidad de raíces ($cm\ cm^{-3}$)			
								0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
Riego	1229a	1247a	50a	170a	25811a	31a	148a	0.26b	0.16b	0.10b	0.05b
Sequía	638b	1123b	35b	112b	12044b	22b	107b	0.45a	0.26a	0.18a	0.10a

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]Ver Materiales y Métodos. ♦ Means with different letter in a row are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]See Materials and Methods.

disminuyeron 34, 30, 29 y 28 %, respectivamente. La BM fue la característica menos afectada por la sequía (10 %) (Cuadro 4). En 20 líneas de arroz seleccionadas por alta BM y sometidas a condiciones de inundación y secano en campo, la mayoría de los genotipos tuvieron buen comportamiento en condiciones de inundación y sólo algunos se comportaron bien en condiciones de estrés hídrico. El germoplasma susceptible al estrés hídrico mostró una reducción significativa en altura de planta, número de macollos por planta y biomasa aérea total en la madurez fisiológica, aunque fue más tardío a floración (Kondhia *et al.*, 2015).

En contraste con lo observado en el rendimiento y sus componentes, el déficit hídrico aumentó la densidad de raíces respecto a riego en todos los estratos del suelo estudiados. La mayor concentración de raíces en promedio ocurrió en el estrato de 0-30 cm tanto en riego (74 %) como en sequía (72 %) (Cuadro 4). Kondo *et al.* (2003) estudiaron el desarrollo de las raíces en la etapa de floración en once genotipos de arroz en Filipinas y el efecto del genotipo explicó la mayor proporción de la variación en el número de raíces nodales, peso específico de la raíz y cociente raíz/parte aérea, mientras que el efecto ambiental fue relativamente grande sobre la profundidad de la raíz y el peso seco total de raíces. En el arroz, el crecimiento del sistema radical es influenciado por el nivel de nutrición y humedad en el suelo. En la Provincia de Jiangsu, China, la variedad Wuyunging 24, sometida a tres dosis de nitrógeno (100, 200 y 300 kg ha⁻¹) y tres regímenes de humedad en el suelo (riego alternado con sequía moderada, riego alternado con sequía severa e inundación continua), exhibió peso seco de raíces en los tratamientos de inundación continua y riego alternado con sequía moderada con 200 y 300 kg N ha⁻¹ mayor que en riego alternado con sequía severa y 100 kg N ha⁻¹ en la etapa de emergencia de la panícula. Por el contrario, el cociente raíz/parte aérea en el tratamiento de riego alternado con sequía severa y 100 kg N ha⁻¹ fue mayor que en los otros tratamientos, indicando que el crecimiento de la raíz en relación con la parte aérea es menos inhibido en condiciones de riego alternado con sequía severa (Wang *et al.*, 2016).

Interacción variedades x niveles de humedad del suelo

La interacción variedades x niveles de humedad edáfica se analizó contrastando el RG y sus componentes

under conditions of water stress. The germplasm susceptible to water stress showed a significant reduction in plant height, number of tillers per plant, and total aerial biomass at physiological maturity, although it was more delayed at flowering (Kondhia *et al.*, 2015).

In contrast with observations in grain yield and its components, the water deficit increased root density as compared to irrigation in every strata of the soil studied. The highest concentration of roots in average took place in the stratum of 0-30 cm both under irrigation (74 %) and drought (72 %) (Table 4). Kondo *et al.* (2003) studied the development of roots in the flowering stage in eleven genotypes of rice in the Philippines; they found that the effect of the genotype explained the higher proportion of variation in the number of nodal roots, specific root weight and root/shoot ratio, while the environmental effect was relatively large on the depth of root penetration and total dry weight of roots. In rice, the growth of the root system is influenced by the level of nutrition and moisture in the soil. In the province of Jiangsu, China, the Wuyunging 24 variety, subjected to three rates of nitrogen (100, 200 and 300 kg ha⁻¹) and three soil moisture regimes (alternate irrigation with moderate drought, alternate irrigation with severe drought and continuous flooding), exhibited higher root dry weight in the treatments of continuous flooding and alternate irrigation with moderate drought with 200 and 300 kg N ha⁻¹, as compared to alternate irrigation treatment with severe drought and 100 kg N ha⁻¹ in the emergence of the panicle. On the contrary, the root/shoot ratio in the alternate irrigation treatment with severe drought and 100 kg N ha⁻¹ was higher than in the other treatments, indicating that root growth in relation with the aerial parts is less inhibited in conditions of irrigation alternating with severe drought (Wang *et al.*, 2016).

Interaction of varieties x levels of soil moisture

The interaction of varieties x levels of soil moisture was analyzed contrasting the GY and its components observed under irrigation with those under rainfed conditions. The GY and G M⁻² showed the highest differences in irrigation – rainfed in average of all the genotypes, followed by the BM, P M⁻², GP, HI and TGW (Table 5). Lines 2, 7, 3, 6, 5, 4, 1 and the control; the control; line 2; lines 2 and 7; line 2; line

observados bajo riego con aquellos bajo condiciones de secano. El RG y $G M^{-2}$ mostraron las mayores diferencias riego – secano en promedio de todos los genotipos, seguidos por la BM, $P M^{-2}$, GP, IC y PMG (Cuadro 5). Las líneas 2, 7, 3, 6, 5, 4, 1 y el testigo; el testigo; la línea 2; las líneas 2 y 7; la línea 2; la línea 7; y la línea 5, mostraron mayor diferencia riego – secano para el RG; BM e IC; $P M^{-2}$; $G M^{-2}$; PMG; y GP, respectivamente (Cuadro 5). Cuando la deficiencia hídrica ocurre durante la fase vegetativa del arroz, su efecto en el desarrollo subsecuente y en el RG es mínimo (30 %), pero cuando ocurre durante el desarrollo de la panícula, su efecto en el RG es significativo (70 %), retrasando la antesis (22-28 d) y reduciendo el número de espiguillas por panícula (60 %) y el número de granos m^{-2} (100 %) o cuando ocurre durante el llenado del grano, su efecto también es significativo en el RG (50 %), retrasando la madurez fisiológica (10-20 d) y disminuyendo el número de granos (40 %) y el peso individual del grano (20 %) (Boonjung y Fukai, 1996). En las tierras bajas del sureste de Asia se determinó que la sequía intermitente y terminal en la época lluviosa redujeron 13 y 35 % el rendimiento de grano de arroz, mientras que en la época seca el rendimiento disminuyó 34 % bajo sequía intermitente y 59 % con sequía terminal. Estos resultados permitieron concluir que la selección de genotipos tolerantes a sequía puede lograrse alternando la evaluación del germoplasma en condiciones de sequía intermitente en la época seca y con sequía terminal en la época lluviosa (Xangsayasane *et al.*, 2014).

En promedio, para todos los genotipos, la densidad de raíces mostró mayores diferencias riego – secano en el estrato de 0-15 cm que en el resto (Cuadro 5). La línea 8, la línea 2 y el testigo, mostraron la mayor densidad de raíces en el estrato de 0-15, estratos 15-30 y 30-50 y 50-70 cm en comparación con el germoplasma restante, respectivamente (Cuadro 5). La mayor acumulación de biomasa en las raíces puede contribuir al mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso del agua en los sistemas agrícolas de secano. El mayor tamaño del sistema de raíces de la planta depende de mayores densidades de raíces, área superficial total de absorción y área activa de la superficie de absorción de las raíces (Chu *et al.*, 2014). Un grupo de líneas derivadas de las cruces entre *O. sativa* (IR64) y *O. glaberrima* (RAM90 y RAM54) mostraron mayor rendimiento de grano en riego y sequía comparados con el progenitor recurrente IR64

7; and line 5, showed a greater difference irrigation – rainfed for GY; BM and HI; $P M^{-2}$; $G M^{-2}$; TGW; and GP, respectively (Table 5). When the water deficiency occurs during the vegetative phase of rice, its effect on the subsequent development and in the GY is minimal (30 %), although when it occurs during the development of the panicle, its effect on the GY is significant (70 %), delaying the anthesis (22-28 d) and reducing the number of spikelets per panicle (60 %) and the number of grains m^{-2} (100 %) or when it occurs during grain filling, its effect is also significant in the GY (50 %), delaying the physiological maturity (10-20 d) and decreasing the number of grains (40 %) and the individual weight of the grain (20 %) (Boonjung and Fukai, 1996). In low lands of southeastern Asia, intermittent and terminal drought in the rainy season reduced 13 and 35 % rice grain yield, while in the dry season yield decreased 34 % under intermittent drought and 59 % with terminal drought. These results allowed concluding that the selection of genotypes tolerant to drought could be achieved by alternating the evaluation of the germplasm under conditions of intermittent drought in the dry season, and with terminal drought in the rainy season (Xangsayasane *et al.*, 2014).

In average, for all the genotypes, the root density showed greater differences irrigation – rainfed in the stratum of 0-15 cm, as compared to the others (Table 5). Line 8, line 2 and the control, showed the highest root density in the stratum of 0-15, strata of 15-30 and 30-50 and 50-70 cm in comparison to the remaining germplasm, respectively (Table 5). The highest biomass accumulation in the roots can contribute to the higher grain yield and efficiency in using water in the agricultural rainfed systems. The larger size of the root system of the plant depends on higher root densities, total absorption surface area, and active root absorption surface area (Chu *et al.*, 2014). A group of lines derived from the crosses between *O. sativa* (IR64) and *O. glaberrima* (RAM90 and RAM54) showed higher grain yield under irrigation and drought, as compared to the recurrent parent IR64 (susceptible to drought) and lower canopy temperature under drought; in addition, the root density was negatively associated to canopy temperature and soil moisture content (Kijoji *et al.*, 2014). Given that the relationship between root density and grain yield in the field was also consistent in some lines, the complex relation

Cuadro 5. Diferencias riego – secano para el rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo. Ciclo primavera-verano 2013, Zacatepec, Morelos, México.
Table 5. Irrigation – rainfed differences for grain yield and yield components, and root density in different strata of the soil. 2013 spring-summer cycle. Zacatepec, Morelos, Mexico.

No. de genotipo	RG [‡]	BM [‡]	IC [‡]	P M ^{-2‡}	G M ^{-2‡}	PMG [‡]	GP [‡]	Densidad de raíces (cm cma ⁻³)			
								0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
2	667a	109b	11cd	128a	30493a	11.3a	61ab	0.07c	0.16a	0.13a	0.05bc
7	610a	56b	11cd	99b	27327a	6.7cd	69a	0.31a	0.07cd	0.08c	0.03bc
3	666a	92b	15bc	22cd	6544e	10.0abc	30ef	0.08c	0.05d	0.06c	0.05bc
6	586a	88b	13cd	32c	10547c	9.3abcd	50bc	0.09c	0.10bc	0.08bc	0.03c
5	673a	156ab	14cd	29cd	10126cd	10.6ab	49bcd	0.13bc	0.03d	0.11ab	0.04bc
4	587a	181ab	12cd	14d	4371e	8.0abcd	22fg	0.27ab	0.09bcd	0.09abc	0.05ab
1	587a	91b	19ab	33c	7132de	7.3bcd	33def	0.25abc	0.12ab	0.07c	0.05bc
8	336b	89b	10d	130a	21964b	6.0d	39cde	0.32a	0.06cd	0.08bc	0.06ab
9(Testigo)	596a	255a	22a	36c	5402e	7.7bcd	8.3 g	0.19abc	0.07cd	0.06c	0.08a
Media general	589	124	14	58	13767	8.5	40	0.18	0.085	0.083	0.048

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). [‡]Ver Materiales y Métodos. ♦ Means with different letter in a row are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). [‡]See Materials and Methods.

(susceptible a sequía) y menor temperatura del dosel vegetal bajo sequía; además, la densidad de raíces se asoció negativamente con la temperatura del dosel vegetal y el contenido de humedad en el suelo (Kijoji *et al.*, 2014). Dado que también la relación entre la densidad de raíces y el rendimiento de grano en campo sólo fue consistente en algunas líneas, se confirmó la relación compleja entre el rendimiento de grano, el crecimiento de las raíces y los mecanismos fisiológicos que controlan el crecimiento del cultivo y la productividad en condiciones de campo.

Rendimiento de grano *vs.* componentes del rendimiento y densidad de raíces

El análisis de componentes principales (CP) del rendimiento de grano versus los componentes del rendimiento y la densidad de raíces, obtenidos para riego y secano mostró que los dos primeros CP explicaron el 83.6 % de la variación conjunta de los datos. El primer CP tuvo correlación positiva con el PMG ($R=0.96$) y el RG ($R=0.93$), mientras que el segundo CP mostró correlación positiva con la BM ($R=0.64$). La BM tuvo relación positiva con $G\ M^{-2}$, $P\ M^{-2}$ y GP, RG y PMG, y negativa con el IC; el IC mostró relación negativa con la DR, sobre todo a los 0-15 cm de profundidad del suelo (Figura 2). La asociación positiva entre el RG y sus componentes, BM y $G\ M^{-2}$ puede ser útil para la selección en ambientes contrastantes en cuanto a la disponibilidad de humedad. Las líneas de arroz más sobresalientes en tres ambientes de México, además de alto rendimiento, mostraron altos porcentajes de recuperación de granos enteros y buena calidad para uso industrial en arroz (Barrios *et al.*, 2016). En cebada cultivada en condiciones de riego, sequía y secano en México se determinó que el rendimiento de grano tuvo relación positiva y significativa con la biomasa aérea y el número de granos m^{-2} . Así, la biomasa aérea a su vez, se asoció positiva y significativamente con el número de granos m^{-2} , de tal forma que los genotipos con mayor rendimiento de grano mostraron mayor biomasa aérea y mayor número de granos m^{-2} (López-Castañeda, 2011).

CONCLUSIONES

El déficit hídrico del suelo durante la floración y el llenado del grano disminuyó el rendimiento de grano y sus componentes en germoplasma de arroz

between the grain yield, the root growth and the physiological mechanisms that control the growth of the crop and the productivity under field conditions is confirmed.

Grain yield *vs.* yield components and root density

The principal components analysis (PC) of grain yield versus yield components and root density, obtained for irrigation and rainfed conditions showed that the two first PC explained 83.6 % of the joint variation of the data. The first PC had positive correlation with TGW ($R=0.96$) and GY ($R=0.93$), while the second PC showed positive correlation with BM ($R=0.64$). The BM had a positive relationship with $G\ M^{-2}$, $P\ M^{-2}$ and GP, GY and TGW, and negative with HI; the HI showed negative relation with RD, particularly at 0-15 cm of soil depth (Figure 2). The positive association between the GY and its components, BM and $G\ M^{-2}$ can be useful for the selection in contrasting environments in terms of the availability of moisture. The most outstanding rice lines in three environments of Mexico, in addition to high yield, showed high percentages of recuperation of full grains and good quality for industrial use of rice (Barrios *et al.*, 2016). In barley cultivated under irrigation, drought and rainfed conditions in Mexico, the grain yield had a positive and significant relationship with the aerial biomass and the number of grains m^{-2} . Thus, the aerial biomass, in its turn, was associated positively and significantly with the number of grains m^{-2} , so that the genotypes with highest grain yield showed higher aerial biomass and higher number of grains m^{-2} (López-Castañeda, 2011).

CONCLUSIONS

The soil water deficit during flowering and grain filling decreased grain yield and its components in the rice germplasm cultivated under rainfed conditions in Zacatepec, Morelos, Mexico, while this deficiency of soil moisture increased the root density in all the strata of the soil studied. Lines 2 and 7 showed the highest grain yields under irrigation and rainfed conditions, as well as values higher than the national average in irrigation and rainfed conditions. The aerial biomass, harvest index, number of panicles m^{-2} , number of grains m^{-2} and number of grains per

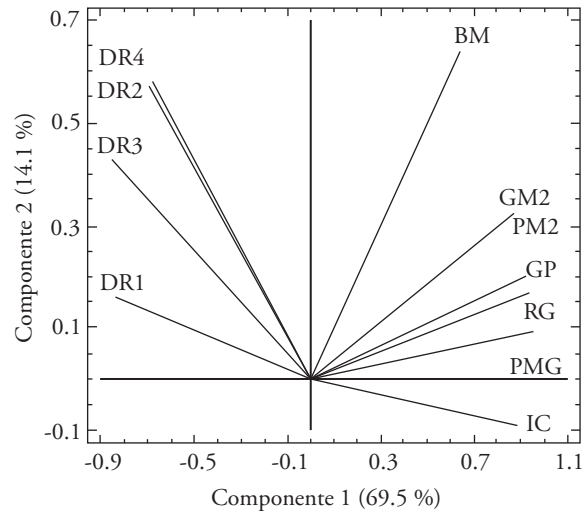


Figura 2. Biplot del rendimiento de grano versus componentes del rendimiento y densidad de raíces para nueve genotipos de arroz en la madurez; BM, biomasa aérea; GM2, número de granos m^{-2} ; PM2, número de panículas m^{-2} ; GP, número de granos por panícula; RG, rendimiento de grano; PMG, peso de mil granos; IC, índice de cosecha; DR1, densidad de raíces en el estrato de 0-15 cm; DR2, densidad de raíces en el estrato de 15-30 cm; DR3, densidad de raíces en el estrato de 30-50 cm; DR4, densidad de raíces en el estrato de 50-70 cm de profundidad del suelo.

Figure 2. Biplot of the grain yield versus yield components and root density for nine genotypes of rice in maturity; BM, aerial biomass; GM2, number of grains m^{-2} ; PM2, number of panicles m^{-2} ; GP, number of grains per panicle; GY, grain yield; TGW, thousand grains weight; HI, harvest index; DR1, root density in the stratum of 0-15 cm; DR2, root density in the stratum of 15-30 cm; DR3, root density in the stratum of 30-50 cm; DR4, root density in the stratum of 50-70 cm soil depth.

cultivado en condiciones de secano en Zacatepec, Morelos, México, mientras que la deficiencia de humedad aumentó la densidad de raíces en todos los estratos del suelo estudiados. Las líneas 2 y 7 mostraron los mayores rendimientos de grano en riego y secano, así como valores superiores al promedio nacional en riego y secano. La biomasa aérea, el índice de cosecha, el número de panículas m^{-2} , número de granos m^{-2} y número de granos por panícula, así como el peso de mil granos se asociaron significativamente con el rendimiento de grano en ambas condiciones de humedad. Las líneas más productivas podrían utilizarse como progenitores en los programas de mejoramiento y como variedades comerciales en los sistemas de producción de arroz, tanto en condiciones de riego como secano.

LITERATURA CITADA

Ahmadi, N., A. Audebert, M. J. Bennett, A. Bishop, A. Costa de Oliveira, B. Curtois, A. Diedhiou, A. Diévar, P. Gantet, A. Ghesquière, E. Guiderdoni, A. Henry, Y. Inukai, L. Kochian, L. Laplace, M. Lucas, D. T. Luu, B. Manneh, X. Mo, R. Muthurajan, C. Périn, A. Price, S. Robin, H. Sentenac, B. Sine,

panicle, as well as the thousand grains weight were significantly associated with the grain yield in both soil moisture conditions. The most productive lines could be used as parents in a rice breeding program and as commercial varieties in the rice production systems, both under irrigation and rainfed conditions.

—End of the English version—

—*—

- Y. Uga, A. A. Véry, M. Wissuwa, P. Wu and J. Xu. 2014. The roots of future rice harvests. *Rice* 7: 1-9.
- Barrios G., E. J., V. H. Rodríguez M., L. Hernández A., L. Tavitas F., A. Hernández P., L. M. Tapia V., y J. M. Pinzón G. 2016. Evaluación de líneas de arroz de grano delgado para riego en México. *Interciencia* 41: 476-481.
- Boonjung, H., and S. Fukai. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology, biomass and yield. *Field Crops Res.* 48: 47-55.
- Boyer, J. S., and W. K. Silk. 2004. Hydraulics of plant growth. *Functional Plant Biol.* 31:761-773.
- Chatel, M., E. P. Guimarães, Y. Ospina, F. Rodríguez, y V. H. Lozano. 2010. Mejoramiento de poblaciones de arroz de

- secano empleando selección recurrente y desarrollo de variedades. In: Degiovanni, V. B., C. P. Martínez R., y F. O. Motta (eds). Producción Eco-eficiente del Arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Publicación CIAT No. 370. Cali, Colombia. pp: 207-222.
- Cho, J., and T. Oki. 2012. Application of temperature, water stress, CO₂ in rice growth models. *Rice* 5: 1-8.
- Chu, G., T. Chen, Z. Wang, J. Yang, and J. Zhang. 2014. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice. *Field Crops Res.* 165: 36-48.
- Fageria, N. K., and A. Moreira. 2011. The role of mineral nutrition on root crop growth of crop plants. *Adv. Agron.* 110: 251-331.
- Feng, X., F. Xu, X. Du, H. Tong, L. Luo, and H. Mei. 2012. Assessment of drought resistance among wild rice accessions using a protocol based on single-tiller propagation and PVC-tube cultivation. *Aust. J. Crop Sci.* 6: 1204-1211.
- García A., J. L., L. Hernández A., y L. Tavitas F. 2011. El Silverio: Nueva variedad de arroz para el trópico mexicano. *Rev. Mex. Ciencias Agr.* 2: 607-612.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 90 p.
- Gowda, V. R. P., A. Henry, A. Yamauchi, H. E. Shashidhar, and R. Serraj. 2011. Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field Crops Res.* 122: 1-13.
- Henry, A., R. Wehler, A. Grondin, R. Franke, and M. Quintana. 2016. Environmental and physiological effects on grouping of drought-tolerant and susceptible rice varieties related to rice (*Oryza sativa*) root hydraulics under drought. *Ann. Bot.* 118: 711-724.
- Jagadish, S.V. K., M.V.R. Murty, and W.P. Quick. 2015. Rice responses to rising temperatures – challenges, perspectives and future directions. *Plant, Cell Env.* 38: 1686-1698.
- Kamoshita, A., R. C. Babu, N. M. Boopathi, and S. Fukai. 2008. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments. *Field Crops Res.* 109 :1-23.
- Kijoji, A. A., S. Nchimbi-Msolla, Z. L. Kanyeka, R. Serraj, and A. Henry. 2014. Linking root traits and grain yield for rainfed rice in sub-Saharan Africa: Response of *Oryza sativa* x *Oryza glaberrima* introgression lines under drought. *Field Crops Res.* 165: 25-35.
- Kondhia, A., R. E. Tabien, and A. Ibrahim. 2015. Evaluation and selection of high biomass rice (*Oryza sativa* L.) for drought tolerance. *Am. J. Plant. Sci.* 6: 1962-1972.
- Kondo, M., P. P. Pablico, D. V. Aragonés, R. Agbisit, J. Abe, S. Morita, and B. Courtois. 2003. Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions. *Plant and Soil* 255: 189-200.
- Kumar, A., S. Dixit, T. Ram, R. B. Yadaw, K. K. Mishra, and N. P. Mandal. 2014. Breeding high-yielding drought-tolerant rice: genetic variations and conventional and molecular approaches. *J. Exp. Bot.* 65: 6265-6278.
- López-Castañeda, C., and R. A. Richards. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristics. *Field Crop Res.* 37: 51-62.
- López-Castañeda, C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Trop. Subtrop. Agroecosystems* 14: 907-918.
- Lynch, J. P., J. G. Chimungu, and K. M. Brown. 2014. Root anatomical phenes associated with water acquisition from drying soil: targets for crop improvement. *J. Exp. Bot.* 65: 6155-6166.
- Miranda-Domínguez, L. E., C. López-Castañeda, I. Benítez-Riquelme y J. A. Mejía-Contreras. 2016. Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variadaeades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad en el suelo. *Terra Latinoam.* 34: 393-407.
- Osuna C, F. J., L. Hernández A., J. Salcedo A., L. Tavitas F., y L. J. Gutiérrez D. 2000. Manual para la Producción de Arroz en la Región Central de México. Libro Técnico No. 1. Campo Experimental Zacatepec, Centro de Investigación Regional del Centro, INIFAP, SAGAR. Zacatepec, Morelos, México. 92 p.
- Pandey, V., and A. Shukla. 2015. Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice Sci.* 22: 147-161.
- Passioura, J. B., and J. F. Angus. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106: 37-75.
- SAGARPA. 2017. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <http://www.sagarpa.gob.mx> (Consulta: marzo 2018).
- Salcedo A., J., y E. J. Barrios G. 2013. Morelos A-08: cultivar de arroz de grano aromático para el estado de Morelos. *Rev. Mex. Ciencias Agr.* 4: 963-968.
- Sánchez, B., A. Rasmussen, and J. R. Porter. 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biol.* 20: 408-417.
- SAS. 2009. The SAS System Program release 9.1 for Windows. SAS Institute, Inc., Cary, North Carolina, U.S.A. Software of statistical analysis.
- Shah, F., J. Huang, K. Cui, L. Nie, T. Shah, C. Chen, and K. Wang. 2011. Impact of high-temperature stress on rice plant and its traits related to tolerance. *J. Agric. Sci. Cambridge* 149: 545-556.
- STATGRAPHICS. 2010. Centurion XVI. Versión 16.1.11. Statpoint Technologies Inc. Software of statistical analysis and graphics (www.STATGRAPHICS.com).
- Tennant, D. M. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1001.
- Wang, Z., W. Zhang, S. S. Beebout, H. Zhang, L. Liu, J. Yang, and J. Zhang. 2016. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Res.* 193: 54-69.
- Xangsayasane, P., B. Jongdee, G. Pantuwan, S. Fukai, J. H. Mitchell, P. Inthapanya, and D. Jothiyangkoon. 2014. Genotypic performance under intermittent and terminal drought screening in rainfed lowland rice. *Field Crops Res.* 156: 281-292.