



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA**

## **VARIABILIDAD GENÉTICA EN RESISTENCIA A SEQUÍA Y TOLERANCIA A CALOR EN ARROZ**

**MÓNICA BEATRIZ LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2017**

---

La presente tesis, titulada: **Variabilidad genética en resistencia a sequía y tolerancia a calor en arroz**, realizada por la alumna: **Mónica Beatriz López Hernández**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



---

**DR. CÁNDIDO LÓPEZ CASTAÑEDA**

ASESOR:



---

**DR. JOSUÉ KOHASHI SHIBATA**

ASESOR:



---

**DR. SALVADOR MIRANDA COLÍN**

ASESOR:



---

**DR. EDWIN JAVIER BARRIOS GÓMEZ**

ASESOR:



---

**DR. CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA**

Montecillo, Texcoco, México, Abril de 2017

# VARIABILIDAD GENÉTICA EN RESISTENCIA A SEQUÍA Y TOLERANCIA A CALOR EN ARROZ

Mónica Beatriz López Hernández, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2017

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de ocho líneas F<sub>6</sub> de arroz (*Oryza sativa* L.) y una variedad nacional, en rendimiento de grano (RG) y sus componentes, densidad de raíces (DR), temperatura (Tc) y depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal (DTc) en riego (R) y sequía (S), durante la floración (F) y llenado del grano (LLG). El experimento se estableció en Zacatepec, Morelos, México en el ciclo de primavera-verano 2013. El germoplasma utilizado provino del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR, Palmira, Cali, Colombia). La siembra se realizó el 10 de junio de 2013, con una densidad de siembra de 100 kg de semilla ha<sup>-1</sup> y dosis de fertilización de 180-40-40. El estrés hídrico redujo el RG 48 % y el componente del rendimiento más afectado fue granos m<sup>-2</sup> (G M<sup>-2</sup>). Se determinó la DR para los estratos 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm y fue mayor en el estrato de 0-15 cm en sequía (45 %) y riego (46 %) que en los otros estratos; la DR en S (0.45, 0.26, 0.18 y 0.10 cm cm<sup>-3</sup>) fue mayor que en R (0.26, 0.16, 0.10 y 0.05 cm cm<sup>-3</sup>) en todos los estratos del suelo. Tc en S fue más alta que en R en F y LLG. Tc se relacionó negativamente con los índices de productividad media (IPM) y tolerancia a sequía (ITS). Tc redujo 25 % el RG, 33 % la biomasa aérea (BM), 15 % el número de G M<sup>-2</sup>, 13 % el número de panículas m<sup>-2</sup> (P M<sup>-2</sup>), 9.6 % el número de granos por panícula (G P) y 7 % el peso de mil granos (PMG), por cada 1 °C de aumento en Tc en promedio de todos los genotipos en R y S. Las Líneas 2 y 7 fueron las más productivas en R y S, tolerantes a sequía y calor, y mostraron mayor BM, G M<sup>-2</sup>, P M<sup>-2</sup>, G P y PMG.

**Palabras clave:** Rendimiento de grano y sus componentes, densidad radical, temperatura del dosel vegetal, depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal, índices de tolerancia y susceptibilidad a sequía, y productividad media.

# GENETIC VARIABILITY IN DROUGHT RESISTANCE AND HEAT TOLERANCE IN RICE

Mónica Beatriz López Hernández, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2017

## ABSTRACT

The objective of this work was to study the behavior of eight F<sub>6</sub> lines of rice (*Oryza sativa* L.) and a national variety in grain yield (GY) and its components, root density (RD), canopy temperature (Tc) and canopy temperature depression (CTD) under irrigation (I) and drought (D) during flowering (F) and grain filling (GF). The experiment was established in Zacatepec, Morelos, Mexico during the spring-summer 2013 season. The germplasm used for the experiment came from the Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR, Palmira, Cali, Colombia). The experiment was sown in June 10, 2013 by using a seeding rate of 100 kg ha<sup>-1</sup> and a fertilizer rate of 180-40-40. Results showed that D reduced GY 48 % and grains m<sup>-2</sup> (G M<sup>-2</sup>) was the most affected yield component. RD was determined at 0-15, 15-30, 30-50 and 50-70 cm in the soil profile and it was greater in the 0-15 cm stratum than in the other strata; RD in D (0.45, 0.26, 0.18 and 0.10 cm cm<sup>-3</sup>) was higher than in I (0.26, 0.16, 0.10, 0.05 cm cm<sup>-3</sup>) in all soil strata. Tc in D was higher than in I at F and GF. Tc was negatively associated with the mean productivity index (MPI) and drought tolerance index (DTI). Tc reduced GY 25 %, aerial biomass (BM) 33 %, G M<sup>-2</sup> 15 %, panicles m<sup>-2</sup> (P M<sup>-2</sup>) 13 %, grains per panicle (G P) 9.6 % and thousand grain weight (TGW) 7 % for each 1 °C of increase in Tc averaged over genotypes in D and I. Lines 2 and 7 were the most productive and drought and heat tolerant and they showed greater BM, G M<sup>-2</sup>, P M<sup>-2</sup>, G P y TGW.

**Key words:** Grain yield and its components, root density, canopy temperature, canopy temperature depression, drought resistance and susceptibility indices, mean productivity index.

## **DEDICATORIA**

A Dios, fuente de mi existencia, por la fortaleza que me otorga en las adversidades y las bendiciones recibidas en mi vida.

A mi madre, Celia López Hernández, por tu infinito amor, cuidados y apoyo incondicional que siempre me has otorgado. No existen palabras que reflejen todo lo que significas en mi vida, pero puedo asegurarte que eres indispensable para sentirme feliz. Con tu ejemplo me has enseñado cosas que valoro y agradezco, además de inculcar siempre en mí el deseo de superación, tu presencia hace que todo sea más fácil y distinto, me impides abandonar la lucha y me alientas a continuar.

A mi hijo: Antonio Villalobos López, por ser la alegría e inspiración en mi vida, a través de ti he conocido el amor puro e incondicional.

A mi esposo Antonio Villalobos González, con amor.

## AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la oportunidad y facilidades otorgadas para la realización de mis estudios de Doctorado.

Al Dr. Cándido López Castañeda por la dirección, enseñanzas y apoyo en la culminación de mis estudios de Doctorado.

A mis asesores: Dr. Josué Kohashi Shibata, Dr. Salvador Miranda Colín, Dr. Edwin J. Barrios Gómez y Dr. Carlos G. Martínez Rueda, por sus enseñanzas y el valioso tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo de investigación.

Al M.C Leonardo Hernández Aragón por su amistad, sus consejos y el apoyo incondicional que siempre me ha otorgado. Por la ayuda en muchas de las actividades realizadas en este trabajo, derivado del proyecto a su cargo: Evaluación de materiales genéticos de arroz de grano largo delgado para las regiones productoras de México.

Al Dr. Edwin Javier Barrios Gómez, por su amistad y apoyo incondicional en el desarrollo de las actividades de campo.

Al M.C Antonio Villalobos González, por el apoyo brindado en muchas de las actividades realizadas en campo.

A los trabajadores de campo Juan Raymundo Espinoza Alvarado y Fidel Pérez Romero, por su confianza y apoyo brindado en muchas de las actividades durante mis estudios de postgrado.

A la Sra. Dalila Torres Venegas por su disponibilidad y gentileza que siempre me mostró durante mis estudios de postgrado.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	iii
<b>ABSTRACT.....</b>	iv
<b>DEDICATORIA.....</b>	v
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	vi
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	x
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	xi
<b>LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE.....</b>	xiii
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Hipótesis general.....	2
1.2.1 Hipótesis específicas.....	2
1.3. Literatura citada .....	3
<b>CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	4
2.1 Ambientes de cultivo del arroz.....	4
2.2 Rendimiento y sus componentes.....	4
2.3 Fenología de la planta.....	5
2.4 Crecimiento o acumulación de biomasa.....	6
2.5 Desarrollo del sistema radical.....	7
2.6 Temperatura y depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal.....	8
2.7 Índices de productividad media, susceptibilidad y tolerancia a sequía.....	10
2.8 Métodos de selección bajo sequía y calor.....	11

2.9 Literatura Citada.....	12
<b>CAPÍTULO III. RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES, Y DENSIDAD DE RAÍCES EN ARROZ BAJO RIEGO Y SEQUÍA</b>	17
3.1 RESUMEN.....	17
3.2 ABSTRACT.....	18
3.3 INTRODUCCIÓN.....	19
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.4.1 Sitio experimental.....	20
3.4.2 Material genético.....	21
3.4.3 Factores de estudio y diseño experimental.....	22
3.4.4 Variables de estudio.....	23
3.4.5 Datos meteorológicos.....	24
3.4.6 Contenido hídrico del suelo.....	24
3.4.7 Análisis estadístico.....	24
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.5.1 Precipitación, temperatura y humedad edáfica.....	24
3.5.2 Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en riego.....	27
3.5.3 Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en sequía.....	30
3.5.4 Comparación riego vs sequía.....	33
3.5.5 Interacción genotipos x niveles de humedad del suelo.....	34
3.5.6 Relación entre el rendimiento de grano y sus componentes.....	37
3.6 CONCLUSIONES.....	38
3.7 LITERATURA CITADA.....	39



<b>CAPÍTULO IV. TOLERANCIA A SEQUÍA Y CALOR EN ARROZ.....</b>	<b>43</b>
4.1 RESUMEN.....	43
4.2 ABSTRACT.....	44
4.3 INTRODUCCIÓN.....	45
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
4.4.1 Sitio experimental, material genético, tratamientos y diseño experimental.....	48
4.4.2 Variables de estudio.....	48
4.4.3 Datos meteorológicos.....	49
4.4.4 Contenido hídrico del suelo.....	50
4.4.5 Análisis estadístico.....	51
4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.5.1 Análisis estadístico.....	51
4.5.2 Temperatura del dosel vegetal y temperatura del ambiente.....	52
4.5.3 Temperatura del dosel vegetal.....	53
4.5.4 Temperatura del dosel vegetal e índices de estrés.....	56
4.5.5 Depresión o abatimiento de la temperatura y rendimiento de grano.....	59
4.5.6 Temperatura del dosel vegetal, rendimiento de grano y sus componentes.....	63
4.6 CONCLUSIONES.....	66
4.7 LITERATURA CITADA.....	67
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1	Características físicas y químicas del suelo utilizado en el experimento de campo.....	21
Cuadro 3.2	Material genético utilizado en el experimento de campo.....	22
Cuadro 3.3	Promedios de rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	29
Cuadro 3.4	Promedios de rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	32
Cuadro 3.5	Promedios de rendimiento 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.....	34
Cuadro 3.6	Promedios de la diferencia riego – sequía para el rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	36
Cuadro 3.7	Coefficientes de correlación entre el rendimiento de grano y sus componentes, calculados con los datos promedio de riego y sequía, para todos los genotipos. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	37
Cuadro 4.1	Rendimiento de grano (RG), biomasa área (BM), granos $m^{-2}$ ( $G M^{-2}$ ), panículas $m^{-2}$ ( $P M^{-2}$ ), granos por panícula (G P), peso de mil granos (PMG), expresados como porcentaje con respecto a la media general de riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Promedio de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada cada 10 días durante el experimento en el ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos. Promedio del número de días a embuche (E), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).....	26
Figura 3.2	Contenido de humedad edáfica en los estratos de 0-20 y 20-40 cm en el tratamiento de sequía en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos. PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; CC= Capacidad de campo. Promedio del número de días a embuche (E), antesis (A) y madurez fisiológica.....	27
Figura 4.1	Promedio de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada cada 10 días, durante el periodo de medición de la temperatura del dosel vegetal (58-119 dds) en el ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos. Promedio del número de días a emergencia de la panícula (EP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).....	50
Figura 4.2	Contenido de humedad edáfica en los estratos de 0-20 y 20-40 cm en el tratamiento de sequía durante el periodo de medición de la temperatura del dosel vegetal (58-119 dds) en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos. PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; CC= Capacidad de campo. Promedio del número de días a emergencia de la panícula (EP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).....	51
Figura 4.3	Relación entre temperatura del aire y temperatura del dosel vegetal en riego y sequía.....	53
Figura 4.4	Temperatura del dosel vegetal (°C) en emergencia de la panícula, antesis y periodo del llenado del grano en riego (a, b y c) y sequía (d, e y f). La barra horizontal representa el valor de la diferencia mínima significativa ( $p \leq 0.05$ ).....	55

Figura 4.5	Relación entre índices de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano ( $ISS_{RG}$ ), biomasa aérea ( $ISS_{BM}$ ) e índice de cosecha ( $ISS_{IC}$ ) y temperatura promedio del dosel vegetal en el periodo de llenado del grano. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	58
Figura 4.6	Relación entre la temperatura del dosel vegetal y el índice de productividad media (PM) (a) y el índice de resistencia a sequía (IRS) (b), para rendimiento de grano en promedio de todos los genotipos de arroz. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	59
Figura 4.7	Depresión de la temperatura del dosel vegetal ( $^{\circ}C$ ) en emergencia de la panícula, antesis y periodo del llenado del grano en riego (a, b y c) y sequía (d, e y f). La barra horizontal representa el valor de la diferencia mínima significativa ( $p \leq 0.05$ ).....	61
Figura 4.8	Relación entre la depresión de la temperatura del dosel vegetal y el rendimiento de grano en riego (a) y sequía (b). Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	62
Figura 4.9	Relación entre la temperatura del dosel vegetal ( $^{\circ}C$ ) promediada de los 58 a los 119 dds y el rendimiento de grano (a), biomasa aérea (b), granos $m^{-2}$ (c), panículas $m^{-2}$ (d), granos por panícula (G P) y peso de mil granos (PMG) en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	64

## LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE

Cuadro 3.1A	Cuadrados medios de rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), panículas m <sup>-2</sup> (P, M <sup>-2</sup> ), granos m <sup>-2</sup> (G, M <sup>-2</sup> ), peso de 1000 granos (PMG), granos por panícula (G P <sup>-1</sup> ), altura de planta (AP, cm), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y densidad radical (DR) en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, en riego, sequía, promedio de riego y sequía, y diferencia riego - sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	73
Cuadro 4.1A	Cuadrados medios de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego, sequía y promedio riego-sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	74
Cuadro 4.2A	Cuadrados medios de la depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	75
Cuadro 4.3A	Promedios de temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	76
Cuadro 4.4A	Promedios de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	77
Cuadro 4.5A	Medias de depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	78
Cuadro 4.6A	Medias de depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.....	79
Cuadro 4.7 A.	Rendimiento de grano en riego (RG <sub>R</sub> ) y sequía (RG <sub>S</sub> ), e índices de susceptibilidad, productividad y tolerancia a la sequía, calculados con el rendimiento de grano en riego y sequía, para todos los genotipos. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.....	80

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de arroz en México, se lleva a cabo bajo tres sistemas de cultivo: siembra directa bajo riego, trasplante bajo riego y siembra directa en condiciones de temporal; esta última tiene una variante que consiste en complementar el aporte de agua de lluvia con riegos de auxilio cuando la planta lo requiere. En cuanto a los ciclos del cultivo, el arroz se siembra tanto en primavera-verano (PV) como en otoño-invierno (OI). En PV se utilizan los tres sistemas de manejo, mientras en OI, el arroz sólo se cultiva en siembra directa bajo riego (Osuna *et al.*, 2000).

El cultivo de arroz (*Oriza sativa* L.) en nuestro país ocupa el cuarto lugar después del maíz, frijol y trigo en cuanto a superficie, producción y consumo, y se cultiva en un área aproximada de 42,310 ha con un rendimiento de grano promedio nacional de 5.8 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2015). El 75 % de esta superficie se cultiva en condiciones de riego o inundación permanente durante el ciclo, con un rendimiento medio de 6.4 t ha<sup>-1</sup> y el 25 % restante, se cultiva bajo condiciones de temporal con rendimientos promedio de 3.8 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2015).

La siembra de arroz en temporal se realiza en el trópico húmedo en la región del sureste de México, que va de la Cuenca del Papaloapan en parte de los estados de Veracruz y Oaxaca, la región de La Chontalpa (Tabasco) a las áreas de Palizada y Yohaltún en el estado de Campeche, zona considerada como vulnerable al cambio climático debido a las pérdidas frecuentes de las cosechas de arroz causadas la por sequía ‘intraestival’ en verano y/o lluvias torrenciales en otoño que causan inundaciones y acame de los cultivos de arroz (Jiménez *et al.*, 2016).

Al considerar el origen filogenético semiacuático y la diversidad de ecosistemas y condiciones de crecimiento para el cultivo del arroz, está claro que los sistemas actuales de producción dependen de un amplio suministro de agua y, por lo tanto, son más vulnerables al estrés por sequía que otros sistemas de cultivo (Barnabas *et al.*, 2008). Los problemas que limitan los rendimientos de arroz en los sistemas de temporal son: la irregularidad de las lluvias con frecuentes periodos de sequía y temperaturas altas que ocasionan estrés a la planta, modificando el desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas (Pandey *et al.*, 2007).

La sequía se puede presentar en diferentes etapas fenológicas del cultivo, reduciendo de manera significativa el rendimiento de grano; Boonjung y Fukai (1996) observaron que un periodo de 23 a 34 días de sequía en la etapa vegetativa redujo 30 % el rendimiento de grano debido a una reducción significativa en el número de panículas m<sup>-2</sup>; la sequía durante el desarrollo de la panícula retrasó la antesis y disminuyó el número de espiguillas por panícula, y el porcentaje de granos

lentos; y la sequía durante el periodo de llenado del grano redujo 60 % el porcentaje de granos llenos y 20 % el peso individual del grano, concluyendo que la variación en los componentes del rendimiento debida a la disponibilidad de humedad se relacionó con la variación en la producción de materia seca en etapas particulares de crecimiento.

El problema de los bajos rendimientos en áreas con estrés hídrico y temperaturas altas, podría resolverse en cierta medida al seleccionar germoplasma de alto rendimiento con atributos de tolerancia a sequía y calor como son: alta acumulación de materia seca, área foliar, peso del grano, porcentaje de granos llenos, índice de cosecha, densidad de raíces, baja temperatura del dosel vegetal y alta depresión o abatimiento de la temperatura. Con estas consideraciones, se planteó el presente estudio con los objetivos e hipótesis siguientes:

**1.1 Objetivo general:** Estudiar la respuesta de diferentes genotipos de arroz a condiciones de riego, sequía y temperaturas altas en campo.

#### **1.1.1 Objetivos específicos**

1. Estudiar la respuesta de diferentes genotipos sobre el rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en riego y sequía, durante las etapas de floración y llenado del grano en condiciones de campo.
2. Evaluar la variabilidad genética en temperatura y depresión de la temperatura de dosel vegetal e índices de productividad, susceptibilidad y tolerancia a sequía en condiciones de riego y sequía en las etapas de floración y llenado del grano.
3. Determinar el efecto de la temperatura de dosel vegetal en el rendimiento de grano y sus componentes.

**1.2 Hipótesis general:** Existe variabilidad genética para la tolerancia a sequía y calor en germoplasma de arroz.

#### **1.2.1 Hipótesis específicas:**

1. Existen genotipos que tienen mejor comportamiento en rendimiento de grano y sus componentes bajo riego y sequía y temperaturas altas.
2. Existen genotipos que desarrollan mayor densidad de raíces y producen mayor rendimiento de grano en riego y sequía y temperaturas altas.

3. Los genotipos que tienen un mayor desarrollo radical mantienen menor temperatura de dosel y mayor abatimiento de la temperatura de dosel bajo riego y sequía y altas temperaturas.

### 1.3 LITERATURA CITADA

Barnabas, B., K. Jager and A. Feher. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* 31: 11–38.

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 production and yield. *Field Crops Res.* 48: 47-55.

Jiménez C, J. A., L. A. Hernández, L. T. Fuentes y P. A. Cándido. 2016. Mejora genética del nuevo arroz de temporal (NAT) para contrarrestar los efectos del cambio climático. *In: Hernández, A. L. y Tavitas, F. L. (eds). El Arroz en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Libro Técnico No. 14. Zacatepec, Morelos. pp: 87-102.*

Osuna, C. F. J., A. L. Hernández, A. J. Salcedo, F. L. Tavitas, y D. J. Gutiérrez. 2000. Manual para la producción de arroz en la región central de México. Libro Técnico No. 1. INIFAP. Campo Experimental Zacatepec, Morelos. México. 82 p.

Pandey, S., H. Bhandari and B. Hardy. 2007. “Economic Costs of Drought and Rice Farmers’ Coping Mechanisms: A Cross-country Comparative Analysis”. International Rice Research Institute, Manila. 203 p.

SAGARPA. 2015. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <http://www.sagarpa.gob.mx> (Consulta de datos estadísticos para el año 2015; Julio 29, 2016).



## **CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Ambientes de cultivo del arroz**

En América Latina y el Caribe (ALC) se produce arroz en diversos sistemas de producción, desde el cultivo intensivo con riego controlado ( $10 \text{ t ha}^{-1}$ ) al de secano muy extensivo como en Brasil o de pequeño agricultor ( $3 \text{ t ha}^{-1}$ ) en América Central. Los principales factores que determinan la elección de uno u otro sistema son: el régimen de lluvias, el costo del riego, el tipo de suelo, la topografía del terreno y la infraestructura disponible. Más del 70 % del área sembrada con arroz en América Latina se cultiva en el sistema de secano que depende exclusivamente de la lluvia, y que se siembra en suelos bien drenados, donde normalmente el nivel freático no aporta humedad al cultivo (Châtel *et al.*, 2010). En México, el arroz se siembra en dos regiones agroclimáticas que se diferencian por sus regímenes termo-pluviométricos y las fuentes de suministro de agua para satisfacer sus necesidades hídricas, las cuales son muy altas dada la fisiología de la planta. Estas dos regiones son: el trópico seco, que por su baja precipitación requiere del suministro artificial del agua mediante el riego durante todo el ciclo de cultivo, y el trópico húmedo, caracterizado por altas precipitaciones que pueden ser abundantes pero irregulares en cuanto a la distribución. En esta región, el cultivo se lleva a cabo principalmente en condiciones de temporal, pero en algunas zonas que cuentan con infraestructura hidráulica se puede cultivar el arroz en condiciones de humedad más favorables aplicando riegos de auxilio, sobre todo en la época de la canícula o sequía intraestival (Rodríguez *et al.*, 2003).

Los factores que limitan el arroz son más severos en el sistema de secano que en el sistema de riego, porque en éste la inundación permanente previene la sequía, aumenta la disponibilidad de nutrientes, disminuye las deficiencias nutricionales, reduce las pérdidas de nitrógeno y facilita el control de las malezas. También reduce la incidencia y la severidad de ciertas enfermedades fungosas, como *Pyricularia oryzae*, *Rhynchosporium oryzae* (escaldado de la hoja), manchado del grano y otras plagas (Châtel *et al.*, 2010).

### **2.2 Rendimiento y sus componentes**

El rendimiento de grano se puede expresar como la respuesta integrada de la planta a los factores del ambiente como la radiación, el agua o los fertilizantes; esta respuesta implica los siguientes dos pasos principales: la producción de fotoasimilados, y su posterior transformación en un componente económico (cosechable), un factor adicional a considerar es la etapa fenológica de

la planta cuando el recurso limitado actúa (Araus *et al.*, 2008). Existen cuatro componentes numéricos de rendimiento que contribuyen significativamente al rendimiento del arroz: número de panículas por unidad de área, número de granos por panícula, porcentaje de granos llenos y peso de mil granos. Cada componente del rendimiento se determina o establece en diferentes etapas del crecimiento de la planta; el número de panículas fértiles se determina durante la fase vegetativa, el número de espiguillas durante la fase reproductiva, el porcentaje de granos llenos y peso del grano durante la fase de maduración. Otros componentes fisiológicos como son la biomasa y el índice de cosecha se calculan a partir de sus componentes morfológicos.

Abade *et al.* (2016), estudiaron el comportamiento de 20 genotipos de arroz bajo dos sistemas de riego en Mozambique y en Malawi, durante 2010 y 2011; observaron diferencias significativas entre genotipos, sistemas de riego y para la interacción genotipos x sistemas de riego, con amplia variabilidad genética en rendimiento de grano y sus componentes granos por panícula, peso de mil granos, número de tallos por planta, número de días a anthesis y madurez fisiológica, los cuales mostraron una estrecha relación positiva con el rendimiento de grano.

Kumar *et al.* (2014) realizaron un estudio en la India con 75 genotipos de arroz en condiciones de riego y en estrés hídrico; se observó una disminución significativa en el rendimiento de grano en todos los genotipos de arroz bajo condiciones de estrés; el rango de disminución del rendimiento fue de 1.3 a 3.0 t ha<sup>-1</sup> en condiciones de estrés hídrico; la media del rango de rendimiento fue de 3.8 a 5.6 t ha<sup>-1</sup> en condiciones de riego. En otro estudio, Guimarães *et al.* (2016) en Brasil, durante 2011 y 2012 realizaron un estudio con 41 genotipos de arroz en condiciones de riego y sequía; el rendimiento medio de los dos años fue de 1.6 y 2.9 t ha<sup>-1</sup> en sequía y riego respectivamente, observando una reducción del 45 % en rendimiento debido al estrés hídrico. Xangsayasane, *et al.*, (2014) observaron reducciones en el rendimiento de 227 líneas experimentales de arroz bajo sequía terminal e intermitente equivalentes a 34 y 59 %, respectivamente. La reducción en el rendimiento de grano en sequía intermitente y terminal, estuvo asociada con una disminución en el porcentaje de granos llenos, índice de cosecha y el número de panículas m<sup>-2</sup>.

### **2.3 Fenología de la planta**

La magnitud de la disminución del rendimiento de grano en condiciones de déficit hídrico depende de la duración y severidad de este tipo de estrés (Kumar *et al.*, 2014), y la etapa fenológica del cultivo (Gana, 2011). Un abatimiento en el contenido de humedad del suelo después de la

siembra, puede reducir severamente la germinación debido a una menor absorción de agua durante la fase de imbibición, al reducir el suministro de energía y alterar las actividades enzimáticas del grano puede resultar en una población subóptima de plantas, causando bajos rendimientos a nivel de cultivo (Taiz y Zeiger, 2010). La reducción en la disponibilidad de humedad del suelo también tiene efecto en el crecimiento y desarrollo de las plántulas de arroz; se observó que dos variedades de arroz de un grupo de seis genotipos, mostraron mayor vigor inicial, desarrollaron un sistema radical más profundo y en menor tiempo en respuesta a la sequía, extrajeron agua del suelo más rápido y declinaron su potencial hídrico de la hoja al amanecer más rápidamente durante un periodo de sequía prolongado a los 21 después de la siembra, pero estos genotipos exhibieron mayor capacidad de recuperación a la sequía a pesar de estar expuestos a un periodo prolongado de sequía en el cual sufrieron mayor reducción en la transpiración, eficiencia en el uso del agua y producción de biomasa; sin embargo, esta mayor capacidad de recuperación al estrés hídrico estuvo más asociada a una mayor biomasa de la planta al final de la sequía que al estatus hídrico de la planta durante la sequía, ajuste osmótico o potencial hídrico de la hoja.

La sensibilidad de la planta a la sequía aumenta durante la etapa reproductiva; la sequía antes de la floración retrasó la antesis y este retraso disminuyó el rendimiento de grano y el porcentaje de espiguillas fértiles y granos llenos (Pantuwan *et al.*, 2002); la sequía en floración y periodo de llenado del grano disminuyó la tasa fotosintética, contenido relativo de agua y la conductancia estomática y estas características mostraron una estrecha relación positiva con la eficiencia en el uso del agua, lo que se reflejó en una reducción de 40 % en el rendimiento de grano (Akram *et al.*, 2013).

## **2.4 Crecimiento o acumulación de biomasa**

La acumulación de biomasa o crecimiento de la planta en condiciones de estrés hídrico sobre todo en la etapa reproductiva está correlacionada con el rendimiento de grano; en el trabajo de Wu *et al.* (2008) un super híbrido de arroz exhibió mayor capacidad de producción de materia seca y alto rendimiento de grano como resultado de un aumento en la acumulación de biomasa después del periodo de elongación del tallo; el alto índice de área foliar y la mayor duración del área foliar también contribuyeron a la alta producción y acumulación de materia seca en la planta. La ventaja en rendimiento de grano bajo sequía en arroz, se debió a que los genotipos sobresalientes mostraron mayor capacidad de removilizar asimilados almacenados en los órganos vegetativos a las

panículas, sin acortar la duración del área foliar entre la floración y la madurez fisiológica de la planta, para permitir que los carbohidratos almacenados pudieran ser asignados a los órganos de almacenamiento como un mecanismo de tolerancia a sequía (Marcaida *et al.*, 2014).

## **2.5 Desarrollo del sistema radical**

Las características de crecimiento del sistema radical de las plantas determinan en cierta medida el volumen potencial de suelo que puede ser explorado para adquirir agua y nutrientes; algunos autores consideran que la investigación en la fisiología de las raíces es la nueva frontera para el avance en la productividad de los cereales en el futuro, dado que las raíces han sido menos estudiadas que los órganos aéreos (Lynch, 2007). Las raíces han sido consideradas por largo tiempo como una de las mayores oportunidades para mejorar la adaptación de los cultivos a condiciones limitantes de humedad; el supuesto simple es que un sistema radical más profundo y más profuso puede extraer más agua del perfil del suelo y atenuar el déficit hídrico, sin embargo, después de décadas de investigación el éxito en los cultivares con sistema radical mejorado está todavía lejos de alcanzarse (Vadez, 2014). Las raíces con mayor diámetro de los vasos de xilema, mayor capacidad de ramificación y penetración de la raíz y mayor relación raíz-vástago, pueden contribuir a que las plantas de arroz puedan escapar a la sequía (Samson *et al.*, 2002; Gowda *et al.*, 2011). Otras características anatómicas de la raíz como el diámetro y abundancia de vasos de xilema, presencia de aerénquima cortical y número de células podrían modificar las propiedades hidráulicas de la raíz; el cambio de las propiedades hidráulicas, al modificar algunas de estas características anatómicas puede proporcionar a la planta mayor capacidad para controlar el uso del agua de manera que esté disponible para las etapas críticas del cultivo. Henry *et al.* (2011), estudiaron la variación en la arquitectura del sistema radical y respuesta a la sequía en 20 genotipos de arroz en secano en Los Baños, Filipinas; determinaron que la densidad de raíces bajo sequía varió significativamente entre genotipos en el estrato de 30-45 cm y esta variación correlacionó con la variación en el contenido de humedad en el suelo e identificaron un cultivar con mayor resistencia a sequía asociada con un sistema radical más profundo y mayor índice de respuesta a sequía (menor reducción del rendimiento por estrés hídrico). Davatgar *et al.* (2009) observaron que el estrés hídrico severo en diferentes etapas de crecimiento causó pérdidas sustanciales de rendimiento debido al aumento en el número de granos vanos; la sequía aumentó el peso seco de la raíz y la transpiración relativa disminuyó significativamente cuando la fracción transpirable de agua en el

suelo, el agua disponible a la planta y la tensión hídrica del suelo alcanzaron un valores de -0.46, -0.9 y 78 kPa, que se reflejaron en valores de la tasa relativa de desarrollo de la hoja de -0.44. -0.91 y 74.6 kPa, respectivamente; indicando que la transpiración y la tasa de desarrollo tienen la misma sensibilidad al estrés hídrico; adicionalmente, concluyeron que una tensión hídrica de 15000 kPa equivalente al PMP no es adecuada para el arroz. O'Toole y Moya. (1981) señalaron que la sequía podría inducir un crecimiento más rápido de las raíces; el aumento del peso seco de la raíz bajo estrés hídrico puede considerarse como el mecanismo adaptativo que alivia la reducción de la captación de agua bajo condiciones de sequía como resultado del crecimiento adicional de raíces. En este mecanismo adaptativo, los asimilados se acumulan y su partición de las hojas y los tallos a las raíces puede renovar el crecimiento de las raíces y resultar en la exploración de más volumen del suelo, lo que permitiría a las plantas extraer más agua (Hsiao *et al.*, 1976).

## **2.6 Temperatura y depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal**

La utilización del termómetro infrarrojo para cuantificar la temperatura del dosel vegetal en condiciones de riego y sequía fue reportada por primera vez en trigo por Blum *et al.* (1982); esta técnica ha mostrado ser una excelente herramienta para la selección de genotipos sobresalientes en rendimiento en ambientes calurosos con riego (Reynolds *et al.*, 1994). La temperatura del dosel vegetal está relacionada con la cantidad de transpiración debida al enfriamiento por efecto de la evaporación (Pietragalla, 2013). La temperatura del dosel vegetal es de muchas maneras, la característica ideal para la selección fisiológica, ya que su medición es rápida, sencilla y de bajo costo; también es una medición integradora, debido a que analiza muchas hojas a la vez, y por lo tanto, reduce el error asociado con la variación en la temperatura de hoja a hoja (Reynolds *et al.*, 2013). La temperatura del dosel vegetal es esencialmente una característica de diagnóstico; al estar asociada con el rendimiento en una gama de condiciones, la temperatura del dosel vegetal es indicativa de la aptitud relativa de un genotipo con el ambiente (Araus *et al.*, 2002). Amén, de que la temperatura del aire no es el único determinante de la temperatura del dosel vegetal se ha podido establecer, que la temperatura del dosel vegetal aumenta en cierta proporción con el aumento de la temperatura del aire y el estrés hídrico (Barrios-Gómez *et al.*, 2011). El aumento en la temperatura de los órganos aéreos de la planta obedece a los mecanismos de apertura y cierre de los estomas, influenciados por las deficiencias hídricas que se generan al disminuir el contenido de humedad en el suelo y los cambios en la temperatura del aire y del dosel vegetal; la exposición de las plantas a

sequía condujo a reducciones notables en el potencial hídrico y contenido relativo de agua en la hoja con un incremento concomitante en la temperatura de la hoja, y el más alto potencial hídrico y contenido relativo de agua, así como la temperatura de hoja más baja estuvieron asociados con una mayor tasa fotosintética (Siddique *et al.*, 2000). La alta temperatura de dosel también redujo la longitud de la panícula y el porcentaje de granos llenos y consecuentemente el rendimiento de grano en arroz cuando la sequía se aplicó en la etapa de floración (Zhang *et al.*, 2007). La temperatura del dosel vegetal en trigo integra muchas funciones fisiológicas (absorción de CO<sub>2</sub>, conductancia estomática, estado hídrico de la planta y el suelo y la presencia de raíces profundas) requeridas para asegurar la adaptación a un ambiente determinado y puede utilizarse como herramienta de selección de líneas parentales para cruces estratégicas y en la selección de generaciones tempranas (a partir de la F<sub>3</sub>) bajo condiciones de sequía (Cossani *et al.*, 2013).

La depresión de la temperatura del dosel vegetal (DTc), se expresa generalmente como la temperatura del aire menos la temperatura del dosel vegetal ( $DTc = T_a - T_c$ , °C), y este valor es más alto y positivo en cultivos bien irrigados (Ray y Ahmed, 2015). Las plantas regulan la tasa de transpiración por el grado de apertura estomática; la velocidad de transpiración también está influenciada por la demanda evaporativa de la atmósfera que rodea la hoja, como la humedad relativa atmosférica, la temperatura, el viento y la intensidad de la luz solar. La cantidad de agua perdida por una planta también depende del tamaño de la raíz y la cantidad de agua absorbida por las raíces. Dado que un papel importante de la transpiración es el enfriamiento foliar, la temperatura de dosel y su reducción respecto a la temperatura del aire ambiente, conocida como depresión o abatimiento de la temperatura (CTD, por su acrónimo en Inglés *canopy temperature depression*), es un indicador de la capacidad de transpiración en el enfriamiento de las hojas, bajo una exigente demanda ambiental. Para un genotipo dado, DTc está en función de una serie de factores ambientales, principalmente el contenido de agua en el suelo, temperatura del aire, incidencia de radiación y humedad relativa, siendo este último rasgo mejor expresado como déficit de presión de vapor (Amani *et al.*, 1996; Cossani *et al.*, 2013).

La depresión de la temperatura es una técnica apropiada para la selección de líneas fisiológicamente superiores en ambientes cálidos y secos, donde la alta demanda evaporativa conduce al enfriamiento de la hoja hasta 10 °C debajo de la temperatura ambiente; esto permite que las diferencias entre genotipos sean fácilmente detectadas con el uso del termómetro infrarrojo; sin embargo, estas diferencias podrían no ser detectadas en ambientes con alta humedad relativa

debido a que el efecto del enfriamiento evaporativo de las hojas es despreciable; no obstante, las hojas mantienen sus estomas abiertos para permitir la absorción de CO<sub>2</sub> y las diferencias en la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> pueden ser indicativas de diferencias en conductancia de la hoja que pueden medirse con un porómetro de difusión (Reynolds *et al.*, 2001). La utilidad de DTc en la selección indirecta por rendimiento en ambientes con temperaturas altas ha sido demostrada en trigo en diversos estudios realizados en campo, donde más del 50 % de la variabilidad en DTc se asoció con la variabilidad en rendimiento de grano en las mismas líneas y sitios en las estaciones experimentales del CIMMYT en Tlaltizapán, Morelos, México, Brasil, Sudán, India y Egipto (Reynolds *et al.*, 2001).

## **2.7 Índices de productividad media, susceptibilidad y tolerancia a sequía**

El mejoramiento genético de arroz para alto rendimiento se sustenta en criterios de selección que permitan identificar genotipos sobresalientes en distintos ambientes con facilidad y eficacia, al evaluar su respuesta al estrés por sequía con base a su rendimiento (Ashraf *et al.*, 2015). Así, el índice de tolerancia a sequía (ITS) expresa el comportamiento relativo de un genotipo comparado con otros genotipos sujetos al mismo estrés por sequía (Hall, 1993); el índice de productividad media (IPM) refleja el comportamiento promedio de genotipos sometidos a ambientes de estrés y no estrés hídrico (Rosielle y Hamblin, 1981); el índice de susceptibilidad a sequía que representa una medida de la reducción en rendimiento bajo condiciones de sequía (Fisher y Maurer, 1978), son todos estos índices medidas del comportamiento del genotipo bajo condiciones de estrés hídrico que pueden aplicarse con relativa facilidad en la selección de genotipos con mejor comportamiento en condiciones de sequía. Además, en la selección de genotipos sobresalientes es recomendable la utilización combinada de un índice que se relacione con la resistencia a sequía y otro con la productividad (Graham, 1984; Rosales-Serna *et al.*, 2000).

El índice de eficiencia relativa de Graham (1984) permite clasificar y seleccionar genotipos que presenten alto rendimiento bajo condiciones de riego y también bajo condiciones de déficit hídrico. Los genotipos con valores altos de este índice pueden considerarse como genotipos estables en condiciones de estrés y no estrés. Fernández (1992) recomienda agrupar los genotipos de acuerdo a su rendimiento en condiciones de estrés y no estrés; por ej., grupo A con los genotipos que expresan superioridad uniforme (altos rendimientos) en condiciones de estrés y no estrés, grupo B genotipos con altos rendimientos en condiciones de no estrés, grupo C genotipos con altos

rendimientos en condiciones de estrés y grupo D genotipos con bajos rendimientos en ambas condiciones. Es recomendable que la selección de genotipos con alto potencial de rendimiento y adaptación a condiciones de sequía se efectúe mediante la combinación de criterios relacionados tanto con el rendimiento promedio de ambas condiciones de humedad (media geométrica de productividad e índice de eficiencia relativa, como con los que involucran la reducción del rendimiento al pasar del riego a sequía (índice de susceptibilidad a sequía y cociente de reducción del rendimiento) (Rosales-Serna *et al.*, 2000).

## **2.8 Métodos de selección bajo sequía y calor**

Frente al escenario del cambio climático global, se requieren avances rápidos en las técnicas de selección que involucren procesos fisiológicos relacionados con el rendimiento de los cultivos y su interacción con el ambiente; por ej., la selección de germoplasma para la expresión de enzimas que participan en el ciclo de Calvin, identificación de bases genéticas comunes para adaptación a sequía y altas temperaturas, y disección genética de balances entre componentes del rendimiento; esta información combinada con resultados de cruza diseñadas para probar combinaciones novedosas de caracteres fisiológicos, pueden conducir a estrategias más precisas de mejoramiento, y aportar bases para los modelos interacción genotipo x ambiente, para ayudar a construir nuevos tipos de plantas y ambientes experimentales para climas futuros (Reynolds y Langridge, 2016). El rendimiento de grano es la característica principal para la selección en programas de mejoramiento con el objetivo de aumentar el potencial de rendimiento y lograr la adaptación a ambientes propensos al estrés (Araus *et al.*, 2008). Sin embargo, la selección indirecta de características secundarias puede ser útil en el mejoramiento para la resistencia a la sequía (Fischer *et al.*, 2003). Dentro de estas características secundarias para la resistencia a la sequía y calor se encuentran: la floración (retraso), porcentaje de espigas fértiles, senescencia de hojas, temperatura del dosel, sistemas radicales profundos, penetración de la raíz a las capas más profundas del suelo, ajuste osmótico, estabilidad de membrana, enrollamiento de la hoja, contenido relativo de agua y uso eficiente del agua (Fischer *et al.*, 2003). Una manera de minimizar la ocurrencia del estrés es mediante el desarrollo de un buen sistema de raíces, que permita a la planta absorber el agua a mayor profundidad del suelo en presencia de sequía (Lopes y Reynolds, 2010), haciendo posible que las tasas de transpiración coincidan con la demanda evaporativa bajo condiciones de altas temperaturas (Amani *et al.*, 1996). En ambientes donde no hay agua ‘extra’ disponible, las



estrategias adaptativas al estrés incluyen un rango de caracteres que reducen la carga de radiación – presencia de cera en las láminas foliares, composición de pigmentos, ángulo de las hojas y enrollamiento de las mismas - mientras que una mayor eficiencia de transpiración permite que el agua disponible sea utilizada más eficientemente (Richards, 2006). La temperatura del dosel y los caracteres de relaciones hídricas (Cossani *et al.*, 2013) enfocan algunas de las herramientas aplicadas más exitosamente en el mejoramiento de trigo para la adaptación a estrés en Australia y en CIMMYT (Rebetzke *et al.*, 2009; Reynolds *et al.*, 2009). Las características relacionadas con la apertura de estomas (tales como la temperatura del dosel, conductancia estomática y discriminación de isótopos de carbono) pueden permitir una estimación eficiente de la tasa de fijación del carbono, haciéndolas próximas a una medición directa de la fotosíntesis. Por ejemplo, bajo condiciones de limitantes de agua, estos caracteres proveen estimaciones de la capacidad de enraizamiento o de la eficiencia de transpiración, mientras bajo condiciones ambientales favorables, se asocian con las limitaciones del potencial de rendimiento tales como el uso eficiente de la radiación o la demanda de asimilados (Reynolds *et al.*, 2013). Peng *et al.*, (2008) mencionaron que la investigación futura en arroz debería centrarse en: 1) comprender la función fisiológica de los caracteres morfológicos de la planta, 2) identificar los factores que limitan el llenado de grano de panículas grandes, 3) estudiar la base fisiológica de la interacción genotipo x ambiente en el rendimiento potencial, 4) diseñar diferentes ideotipos en ambientes diversos, y 5) desarrollar estrategias de manejo de cultivo para lograr la expresión completa del potencial de rendimiento.

## 2.9 LITERATURA CITADA

- Abade, H., J. M. Bokosi, A. M. Mwangwela, T. R. Mzengeza and A. J. Abdala. 2016. Characterization and evaluation of twenty rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under irrigated ecosystems in Malawi and Mozambique. *Afr. J. Agric. Res.* 11: 1559- 1568.
- Akram, H. M., A. Ali, A. Sattar, H. S. U. Rehman and A. Bibi. 2013. Impact of water deficit stress on various physiological and agronomic traits of three basmati rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *J. Animal & Plant Sci.* 23(5): 1415-1423.
- Amani, I., R. A. Fischer and M. P. Reynolds. 1996. Canopy temperature depression association with yield of irrigated spring wheat cultivars in a hot climate. *J. Agron. Crop Sci.* 176: 119–129.

- Araus, J. L., G. A. Slafer, M. P. Reynolds and C. Royo. 2002. Plant breeding and drought in C<sub>3</sub> cereals: What should we breed for? *Ann. Bot.* 89: 925–940.
- Araus, J. L., G. A. Slafer, C. Royo and M. D. Serret. 2008. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27:377–412.
- Ashraf, A., A. El-Mohsen, M.A.A. 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 (1): 19-30.
- Barrios-Gómez, E. J., C. López-Castañeda y J. Kohashi-Shibata. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agron. Costarric.* 35: 131-145.
- Blum, A., J. Mayer, and G. Gozlan. 1982. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.* 5: 137–146.
- Châtel, 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.*
- Cossani, C., J. Pietragalla y M. P. Reynolds. 2013. Temperatura del dosel vegetal y características de la relación planta-agua. *In: Reynolds, M. P., A. Pask, D. Mullan y P. Chávez-Dulanto., (Eds.). Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo. México, D.F.: CIMMYT. pp: 60-68.*
- Davatgar, N., M. R. Neishabouri, A. R. Sepaskhah and A. Soltani. 2009. Physiological and morphological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to varying water stress management strategies. *Intl. J. Plant Prod.* 3(4): 19-32.
- Fernandez, G. C. J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *In: Proc. of the Int. Symp. On adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress. Taiwan: 257-270.*
- Fischer, A. T. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res* 29: 897-912.
- Fischer, K. S., R. Lafitte, S. Fukai, G. Atlin and B. Hardy. 2003. Breeding rice for drought-prone environments. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 98 p.

- Gana, A. S. 2011. Screening and resistance of traditional and improved cultivars of rice to drought stress at Badeggi, Niger State, Nigeria. *Agric. Biol. J. North Am.* 2(6): 1027–1031.
- Gowda, V. R., 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): 1–13.
- Graham, R. D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Adv. Plant Nutr.* 1:57-102.
- Guimarães, C. M., A. Pereira de Castro, L. F. Stone and J. Pereira de Oliveira. 2016. Drought tolerance in upland rice: identification of genotypes and agronomic characteristics. *Acta Sci. Agron.* 38 (2): 201-206.
- Hall, A. E. 1993. Is dehydration tolerance relevant to genotypic differences in leaf senescence and crop adaptation to dry environments? *In: Close TJ and Bray EA (Eds) Plant Responses to cellular Dehydration during environmental stress.* pp: 1 -10.
- Hsiao, T. C., E. Fereres, E. Acevedo and W. Henderson. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. *In: Lang, O.L., Kappan, L., and Schulz, E.D. (Eds.) Water and plant life. Problems and modern approaches.* Springer-Verlag. pp: 281-305.
- Henry, A., V. R. Gowda, R. O. Torres, K. L. McNally and R. Serraj. 2011. Variation in root system architecture and drought response in rice (*Oryza sativa* L.): phenotyping of the OryzaSNP panel in rainfed lowland fields. *Field Crops Res.* 120: 205–214.
- Kumar, S., S. K. Dwivedi, S. S. Singh, K. J. Lekshmy, R. Elanchezhian, O. N. Singh and B. P. Bhatt. 2014. Identification of drought tolerant rice genotypes by analysing drought tolerance indices and morpho-physiological traits. *SABRAO J. Breed. Genet.* 46 (2): 217-230.
- Lopes, M. S. and M. P. Reynolds. 2010. Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. *Funct. Plant Biol.* 37: 147–156.
- Lynch, J. 2007. Roots of the second green revolution. *Aust. J. Bot.* 55: 493–512.
- Marcaida, M., T. Li, O. Angeles, G. K. Evangelista, M. A. Fontanilla, J. Xu, Y. Gaob, Z. Li and J. Ali. 2014. Biomass accumulation and partitioning of newly developed Green Super Rice (GSR) cultivars under drought stress during the reproductive stage. *Field Crops Res.* 162: 30–38.
- O’Toole, J. C and T. B. Moya. 1981. Water deficits and yield in upland rice. *Field Crops Res.* 4: 247-259.

- Pantuwan, G., S. Fukai, M. Cooper, S. Rajatasereekul, and J. C. O'Toole. 2002. Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to drought under rainfed lowlands: 2. Selection of drought resistant genotypes. *Field Crops Res.*73: 169–180.
- Peng, S., G. S. Khush, P. Virk, Q. Tang, and Y. Zou. 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field crops Res.* 108: 32-38.
- Pietragalla, J. Temperatura del dosel. 2013. *In: Pask, A., J. Pietragalla, D. Mullan., P. Chávez-Dulanto., P. N. y Reynolds, M. P. (Eds.) 2013 Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo. México, D.F.: CIMMYT. pp: 10-14.*
- Ray, J. and J. U. Ahmed. 2015. Canopy temperature effects on yield and grain growth of different wheat genotypes. *J. Agric. Vet. Sci.* 8: 48-55.
- Rebetzke, G. J., S. C. Chapman, L. McIntyre, R. A. Richards, A. G. Condon, M. Watt and H. Van 2009. Grain yield improvement in water-limited environments. *In: Carver, B. F. (Ed.) Wheat: Science and Trade. Ames, Iowa, US, Wiley–Blackwell. pp: 215–249.*
- Reynolds, M. and P. Langridge. 2016. Physiological breeding. *Curr. Opin. Plant Biol.* 31:162–171.
- Reynolds, M. P., S. Nagarajan, M. A. Razzaque, and O. A. A. Ageeb. 2001. Heat tolerance. *In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, I. y McNab, A. (Eds.). Application of physiology in wheat breeding. CIMMYT, Mexico. pp: 124-135.*
- Reynolds, M. P., Y. Manes, A. Izanloo and P. Langridge. 2009. Phenotyping for physiological breeding and gene discovery in wheat. *Ann. Appl. Bio.* 155: 309–320.
- Reynolds, M., M. Balota, M. Delgado, I. Amani and R. Fischer. 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Funct. Plant Biol.* 2: 717–730.
- Reynolds, M. P., Y. Manes y G. Rebetzke. 2013. Aplicación de la fisiología en el fitomejoramiento para estrés por calor y sequía. *In: Reynolds M. A. Pask, D. y P. Chávez. (Eds.) Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para Mejorar la Adaptación del Cultivo. México, D.F.: CIMMYT. pp: 18-32.*
- Richards, R. A. 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agric. Water Manage.* 80: 197–211.

- Rodríguez, A. H., Almeyda, L. H., Orona, C. F y P. A Palacios. 2003. Arroz. Tecnologías de Producción para el Trópico Húmedo de México. Publicación especial. Secretaría de Agricultura y Recurso Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Centro de Investigación Regional del Sureste. Campo Experimental Adzná, Camp. 31 p.
- Rosales- Serna, R. P. Ramírez- Vallejo, J. A. Acosta- Gallegos, F. Castillo- González, and J. D. Kelly. 2000. Rendimiento de grano y tolerancia a la sequía del frijol común en condiciones de campo. *Agrociencia*. 34 (2). pp: 153-165.
- Rosielle, A. and J. Hamblin. 1981. Theoretical aspect of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Sci*. 21: 943-946.
- Samson, B. K., H. Hasan and L. J. Wade. 2002. Penetration of hardpans by rice lines in the rainfed lowlands. *Field Crops Res*. 76: 175–188.
- Siddique, M. R. B, A. Hamid, M. S. Islam. 2000. Drought stress effects on water relations of wheat. *J. Bot. Stud*. 41: 35-39.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant Physiology*, 5th ed. Sinauer Associates Inc. Publishers, Massachusetts.
- Vadez, V. 2014. Root hydraulics: The forgotten side of roots in drought adaptation. *Field Crops Res*. 165: 15–24.
- Wu, W. G., Zhang, H. C., Qian, Y. F., Cheng, Y., Wu, G. C., Zhai, C. Q., Dai, Q. G., 2008. Analysis on dry matter production characteristics of super hybrid rice. *Rice Sci*. 15: 110–118.
- 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.
- Zhang, W. Z., Y. D. Han and H. J. Du. 2007. Relationship between canopy temperature at flowering stage and soil water content, yield components in rice. *Rice Sci*. 14(1): 67-70.

## CAPÍTULO III. RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES, Y DENSIDAD DE RAÍCES EN ARROZ BAJO RIEGO Y SEQUÍA

### 3.1 RESUMEN

En México, el arroz (*Oriza sativa* L.) se cultiva en riego o inundación y secano con restricciones de humedad y periodos frecuentes de sequía durante el ciclo de cultivo; 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 densidad de raíces (DR) en ocho líneas F<sub>6</sub> de arroz y una variedad nacional, en riego (R) y sequía (S) en Zacatepec, Morelos, México. Las líneas provienen de los viveros del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR, Palmira, Cali, Colombia). La siembra se hizo el 10 de junio de 2013, con una densidad de siembra de 100 kg de semilla ha<sup>-1</sup> y dosis de fertilización de 180-40-40. El RG, la biomasa aérea (BM) y el número de granos m<sup>-2</sup> (G M<sup>-2</sup>) fueron las características más afectadas por la sequía. La DR en riego (45 %) y sequía (46 %) fue mayor en el estrato de 0-15 cm; la DR en S (0.45, 0.26, 0.18 y 0.10 cm cm<sup>-3</sup>) fue mayor que en R (0.26, 0.16, 0.10 y 0.05 cm cm<sup>-3</sup>) en todos los estratos del suelo. Las Líneas 2 y 7 fueron las más productivas en R y S, estas mostraron alta BM, índice de cosecha (IC) y G M<sup>-2</sup>. 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 nacional 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 para áreas de riego y secano.

**Palabras clave:** Biomasa aérea, índice de cosecha, floración, interacción genotipo x ambiente, periodo de llenado del grano.

## CHAPTER 3. GRAIN YIELD AND ITS COMPONENTS, AND ROOT DENSITY IN RICE UNDER IRRIGATION AND DROUGHT CONDITIONS

### 3.2 ABSTRACT

In Mexico, rice (*Oryza sativa* L.) is grown under irrigation (I) and rainfed conditions with frequent periods of drought (D) during the growing season; grain yield (GY) is severely reduced when drought coincides with flowering and the grain filling period. The objective of this study was to assess GY and its components, and root density (RD) in a group of eight F<sub>6</sub> lines of rice and a national variety under I and D in Zacatepec, Morelos, Mexico. The F<sub>6</sub> lines were obtained from the Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR, Palmira, Colombia). The experiment was sown in June 10, 2013 by using a seeding rate of 100 k ha<sup>-1</sup> and a fertilizer rate of 180-40-40. Results showed GY, aerial biomass (BM) and grains m<sup>-2</sup> (G M<sup>-2</sup>) were the most affected plant characteristics by D. RD in I (45 %) and D (46 %) was higher in the 0-15 cm stratum; RD in D (0.45, 0.26, 0.18 and 0.10 cm cm<sup>-3</sup>) was greater than in I (0.26, 0.16, 0.10, 0.05 cm cm<sup>-3</sup>) down to 70 cm soil depth. Lines 2 and 7 were the most productive in D and I; these genotypes showed high BM, harvest index (HI) and G M<sup>-2</sup>. Line 2 also showed greater RD than the other Lines at 15-30, 30-50 and 50-70 cm strata in D and I. The national variety showed lower GY, yield components and RD than the other lines. GY was positive and significantly related to yield components in D and I. The high-yielding lines could be used commercially and as parents in plant breeding programs for the breeding of GY in irrigation and rainfed areas.

**Key words:** Aerial biomass, flowering, grain filling period, harvest index, genotype x environment interaction.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

En México, el arroz se cultiva en un área aproximada de 42,310 ha con un rendimiento de grano promedio nacional de 5.8 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2015). El 75 % de esta superficie se cultiva en condiciones de riego o inundación permanente durante el ciclo, con un rendimiento medio de 6.4 t ha<sup>-1</sup> y el 25 % restante, se cultiva bajo condiciones de secano con rendimientos promedio de 3.8 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2015). A nivel nacional, se distinguen tres zonas agroclimáticas para el cultivo del arroz: trópico húmedo, trópico subhúmedo y trópico seco, cada zona con diferentes problemáticas agronómicas y de producción, entre las que destacan la escasez de agua para riego, periodo de lluvias errático con eventos de sequía intermitente, intraestival y/o terminal; inundaciones provocadas por huracanes, estrés por altas temperaturas, competencia con malezas, presencia de plagas y enfermedades, deficiencias o toxicidad nutricional, y altos costos de producción (Jiménez *et al.*, 2014). Una de las zonas de trópico seco que se destaca por sus altos rendimientos de grano bajo riego, se localiza en el estado de Morelos, con rendimientos promedio de 10.1 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2015); estos niveles de rendimiento, se deben presumiblemente a la utilización de variedades con alto potencial productivo y condiciones favorables de clima, caracterizadas por un reducido número de días nublados, lo que permite altos niveles de radiación solar durante el desarrollo del cultivo (Osuna *et al.*, 2000).

El arroz requiere un alto volumen de agua durante su ciclo biológico en comparación con otros cultivos 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 de su ciclo; por esta razón, el suministro adecuado de agua es el factor más importante en los sistemas de producción de este cereal (Châtel *et al.*, 2010). No obstante, existen 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 causado por factores bióticos y abióticos que reducen considerablemente el rendimiento y calidad del grano (López-Castañeda, 2013). El déficit hídrico por sí mismo es el factor abiótico con mayor impacto en el rendimiento de los cultivos de secano, al afectar características morfológicas (número de panículas, 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 moleculares (alteración en la expresión de genes que codifican factores de transcripción y proteínas de defensa) (Pandey y Shukla, 2015; Khondia *et al.*, 2015).

Por otro lado, la raíz es el órgano que percibe en primera instancia el déficit hídrico edáfico; las raíces tienen como función clave la absorción de agua y nutrientes del suelo, y constituyen un componente significativo de la adaptación de la planta en ambientes con limitaciones de humedad. La obtención de nuevos cultivares con atributos que favorecen el crecimiento de raíces, para la extracción de agua en capas más profundas del suelo, podrían tener un impacto significativo en la seguridad alimentaria nacional y global (Lynch *et al.*, 2014).

La creciente demanda de alimentos, la vulnerabilidad al cambio climático y la incidencia frecuente de factores bióticos y abióticos desfavorables durante la estación de crecimiento, hacen necesario el estudio de las bases genéticas y fisiológicas del rendimiento bajo condiciones de estrés ambiental, para la selección de nuevos cultivares con alto rendimiento y mejor adaptación a las variaciones ambientales (López-Hernández *et al.*, 2016); en estas condiciones el rendimiento de grano podría mejorarse, al identificar a nivel de planta, aquellos factores genéticos y fisiológicos que determinan mayor acumulación de biomasa y mayor asignación de materia seca al grano (índice de cosecha) (Passioura y Angus, 2010). Existe evidencia de variabilidad genética para rendimiento de grano bajo condiciones de estrés hídrico, con mayor capacidad de acumulación de biomasa en los órganos aéreos y raíces, y/o mayor índice de cosecha (López-Castañeda, 2011). El objetivo del presente trabajo fue estudiar la respuesta de ocho líneas avanzadas y una variedad testigo de arroz evaluadas bajo riego y sequía en condiciones de campo durante las etapas de floración o antesis y llenado del grano, y su efecto sobre el rendimiento de grano y sus componentes.

### **3.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1 Sitio experimental**

El experimento se estableció en el Campo Experimental Zacatepec, Morelos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México (18° 39' N, 99° 12' O y 900 msnm) en el ciclo de primavera-verano 2013. En esta localidad se tiene un clima de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano (Awo (w)), con precipitación media 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 'intraestival' o 'canícula' en julio (García, 1988). El suelo del lugar es

de textura arcillosa con mayor capacidad de campo (CC), porcentaje de marchitamiento permanente (PMP), pH, conductividad eléctrica (CE) y contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el estrato de 0-20 cm que en el estrato de 20-40 cm; la densidad aparente fue mayor en el estrato de 20-40 cm que en el estrato de 0-20 cm; el análisis físico y químico del suelo se realizó en el laboratorio de Edafología del Colegio de Postgraduados (Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1. Características físicas y químicas del suelo utilizado en el experimento de campo.**

Estrato cm	Características físicas y químicas									
	Textura	DA	CC	PMP	pH	CE	MO	N	P	K
0-20	Arcilla	1.85	54.8	32.2	7.6	0.59	2.2	0.11	14.3	0.29
20-40	Arcilla	1.90	53.0	31.2	7.5	0.45	1.0	0.07	5.1	0.15

La textura se determinó, método del hidrómetro de Bouyoucos; DA: densidad aparente, método del terrón parafinado ( $\text{g cm}^{-3}$ ); CC: capacidad de campo (%), método de la olla de presión equivalente a 0.1 kPa; PMP: porcentaje de marchitamiento permanente (%), método de membrana de presión equivalente a 15 kPa; pH, medidor electrónico de pH; CE: conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ), método del puente de conductividad eléctrica; MO: materia orgánica (%), método de Walkley-Black; N: nitrógeno total (%), método de microKjeldahl, semi-micro; P: fósforo (ppm), método de Olsen; K: potasio (ppm), método de fotometría de flama.

### 3.4.2 Material genético

Se incluyeron ocho líneas avanzadas ( $F_6$ ) de arroz con características de alto rendimiento y resistencia al vector del virus de la hoja blanca (*Tagosodes oryzae*) y “quema” del arroz (*Pyricularia oryzae*), calidad superior de grano, definida por su contenido de amilosa, apariencia del grano procesado, alta recuperación de granos enteros y tolerancia al retraso en cosecha (Châtel *et al.*, 2010); las líneas proceden de los viveros del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR, Palmira, Colombia) (Cuadro 3.2). El material genético se preseleccionó por rendimiento de grano en ambientes de trópico húmedo, subhúmedo y seco en el ciclo primavera-verano (P-V) 2012 por investigadores del INIFAP en diferentes localidades (Palizada, Campeche; Zacatepec, Morelos; Cárdenas, Tabasco; y Tecomán, Colima, México); se utilizó como testigo la variedad comercial “El Silverio” (Cuadro 3.2).

**Cuadro 3.2. Material genético utilizado en el experimento de campo.**

No. de genotipo	Genealogía	Origen	Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )	Días a anthesis	Resistencia genética
1	FL04621-2P-1-3P-3P-M	P-V 2005	6.8	85	Virus de la hoja blanca y “quemado” del arroz
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	“Quemado” del arroz

Fuente: Dr. Leonardo Hernández Aragón, Líder Nacional del Programa de Arroz, INIFAP, Zacatepec, Morelos.

### 3.4.3 Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron dos niveles de humedad edáfica; a través de dos experimentos de campo. En el primero de ellos se aplicó riego por inundación por gravedad cada semana desde la siembra hasta la madurez fisiológica, para mantener el suelo saturado permanentemente. En el segundo experimento se estudió el efecto de sequía, suspendiendo el riego a los 26 días después de la siembra (dds), y después el cultivo se mantuvo a merced de la lluvia hasta la madurez fisiológica. En cada experimento se establecieron los 9 genotipos bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones; la unidad experimental fue de seis surcos de 5 m de longitud separados a 0.2 m. La siembra se realizó en forma directa en suelo seco a “chorrillo” el 10 de junio de 2013 con una densidad de siembra de 100 kg de semilla ha<sup>-1</sup> y dosis de fertilización de 180-40-40; se aplicó un tercio del nitrógeno y todo el fósforo y potasio en la siembra; un segundo tercio de nitrógeno al inicio de la etapa de amacollamiento (25 dds) y el resto del nitrógeno en la etapa de embuche (70 dds), con urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

El control de malezas se realizó con dos aplicaciones de herbicida; la primera en preemergencia, tres días después del riego de siembra, con Oxadiazón a una dosis de 2 L ha<sup>-1</sup> y la segunda a los 21 dds, cuando las malezas de hoja angosta y las de hoja ancha, tenían entre 3 a 4 hojas expuestas; con el empleo de herbicidas postemergentes Propanil y 2,4-D diclorofenoxiacético a una dosis de 6.0 y 1.5 L ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Esqueda, *et al.*, 2010). El control del barrenador blanco del tallo (*Rupela albinella*), gusano soldado (*Spodoptera frugiperda* Smith) se realizó con la aplicación de cipermetrina 0.25 L ha<sup>-1</sup> a los 66 y 90 dds.

#### **3.4.4 Variables de estudio**

Biomasa aérea final (BM, g m<sup>-2</sup>); se determinó después de la madurez fisiológica al cosechar las plantas presentes en un área de 1 m<sup>2</sup> en los cuatro surcos centrales y obtener el peso seco total de la parte aérea, dividiéndolo entre el área cosechada.

Rendimiento de grano (RG, g m<sup>-2</sup>); se obtuvo al determinar el peso del grano después del desgrane de todas las panículas de las plantas cosechadas, en la muestra utilizada para determinar la biomasa aérea final y dividirlo entre el área cosechada.

Índice de cosecha (IC); se calculó como el cociente entre el rendimiento del grano y la biomasa aérea final [(IC = RG / BM) \* 100].

Número de panículas m<sup>-2</sup> (P M<sup>-2</sup>); se contó el número de panículas con grano en la muestra utilizada para determinar la biomasa aérea final y dividirlo entre el área cosechada.

Número de granos por panícula (G P); se determinó al promediar el número de granos en 50 panículas elegidas al azar, en la muestra utilizada para determinar la biomasa aérea final.

Número de granos m<sup>-2</sup> (G, M<sup>-2</sup>); se calculó al multiplicar el número promedio de granos por panícula por el número de panículas m<sup>-2</sup>.

Peso de mil granos (PMG, g); se obtuvo al pesar 1000 granos elegidos al azar de la muestra utilizada, para determinar el rendimiento de grano.

Densidad de raíces (DR, cm cm<sup>-3</sup>); se obtuvieron muestras de suelo de todas las parcelas del experimento, para calcular la densidad de raíces. 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 0-20 y 20-40 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; luego, los segmentos de

raíz se dispersaron en 500 mL de agua en una charola de plástico transparente de 30 x 40 cm, colocada sobre una cuadrícula de 0.5 x 0.5 cm (Tennant, 1975). El número de intersecciones se contó entre los segmentos de raíz y las líneas verticales y horizontales de la cuadrícula (Tennant, 1975). La densidad de raíces (cm raíz. cm<sup>-3</sup> suelo) se estimó como el producto del número de intersecciones x el factor de conversión de longitud (0.3928), para una cuadrícula de 0.5 x 0.5 cm (Tennant, 1975; López-Castañeda y Richards, 1994).

### **3.4.5 Datos meteorológicos**

Los datos de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada cada 10 días, se obtuvieron de una estación meteorológica distante a 50 m del experimento, dentro del Campo Experimental Zacatepec, del INIFAP Morelos.

### **3.4.6 Contenido hídrico del suelo**

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

### **3.4.7 Análisis estadístico**

Con los datos obtenidos de cada parcela se realizaron análisis de varianza para cada uno de los experimentos (riego y sequía) y en forma combinada para determinar la significancia de la interacción genotipo x ambiente en todas las variables con el procedimiento GLM del programa SAS, Versión 9.1, para Windows (SAS, 2009). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) a un nivel de probabilidad de error de 0.05.

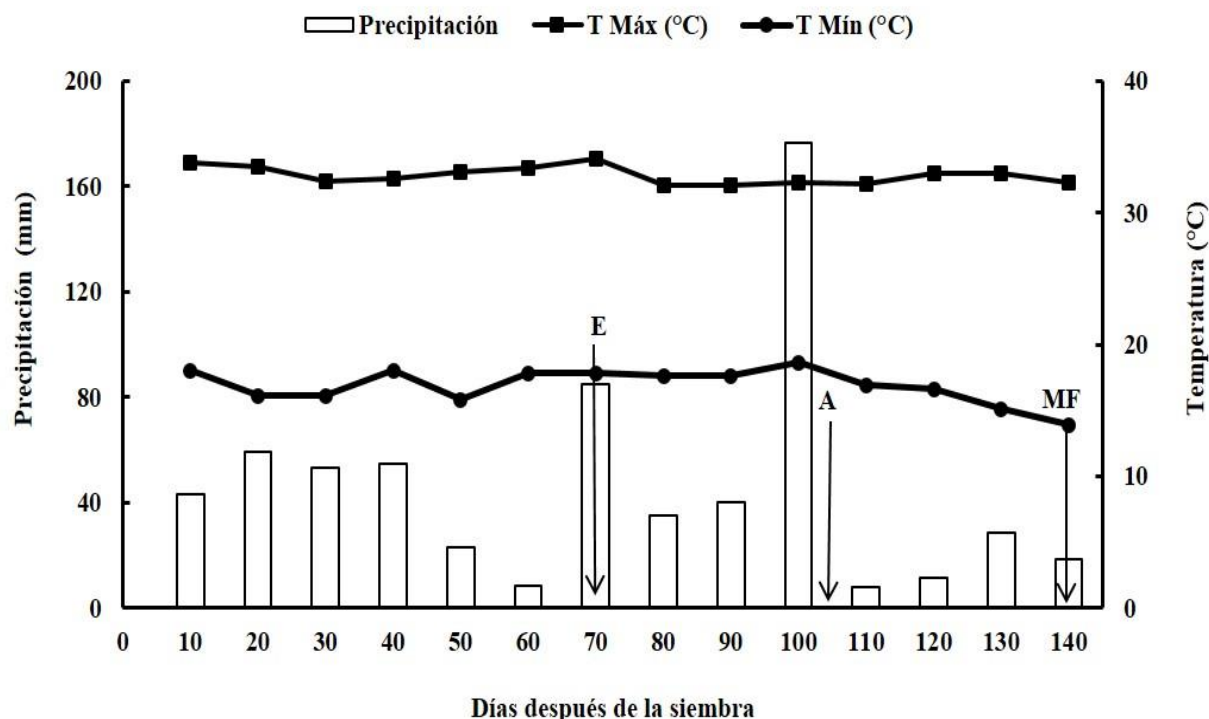
## **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.5.1 Precipitación, temperatura y humedad edáfica**

La precipitación pluvial registrada durante el experimento fue 645 mm, distribuidos irregularmente durante la estación de crecimiento; se observó una disminución considerable en la cantidad de lluvia en los periodos de 50 a 60, 80 a 90 y 110 a 140 dds, que coincidieron con la parte final de la fase vegetativa, emergencia de la panícula, anthesis y el periodo de llenado de grano

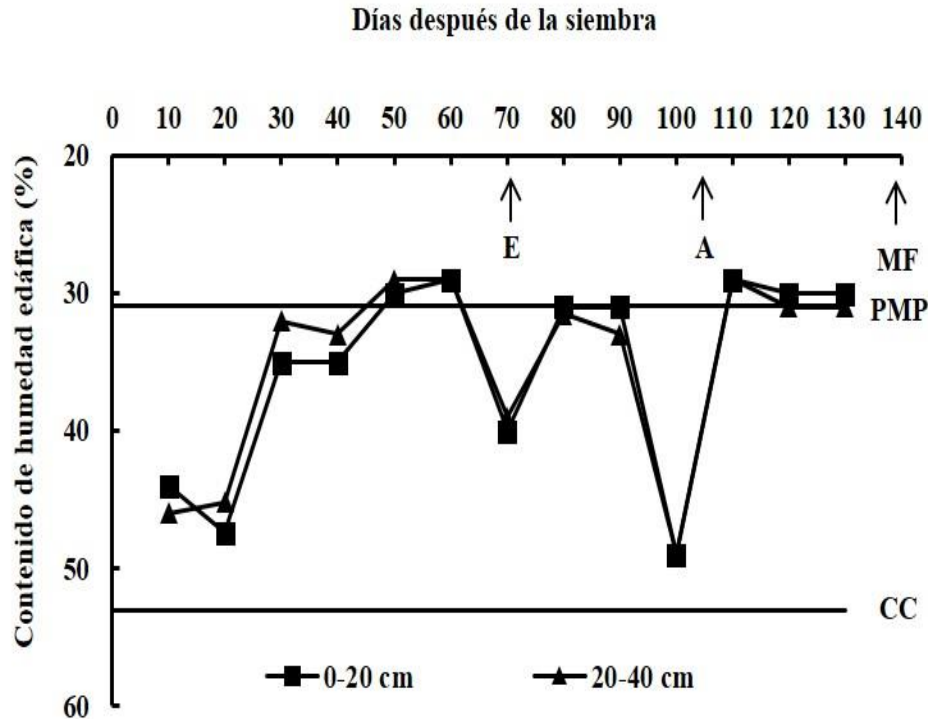
(Figura 3.1). El estrés por sequía durante el crecimiento vegetativo, en especial en la fase inicial, puede interrumpir la iniciación floral causando reducción en el número de espiguillas, mientras la ocurrencia de sequía durante y después de la floración disminuye la tasa de llenado de grano, lo que impacta negativamente en el número y peso individual de grano, principales componentes del RG en arroz (Pantuwan *et al*, 2002; Kamoshita *et al*, 2008). Las deficiencias hídricas en la etapa reproductiva reducen considerablemente el contenido hídrico en las células de la planta, mostrando síntomas de marchitamiento y pérdida de turgencia, que repercuten en una disminución del intercambio gaseoso y fotosíntesis de la planta y finalmente en el rendimiento de grano (Blum, 2011).

Las temperaturas máxima y mínima del aire mostraron poca variación durante el ciclo de las plantas con promedios de 17 y 33 °C (Figura 3.1); estos valores se ubicaron entre la temperatura mínima (13.5 °C) y la temperatura máxima de la planta (35.4 °C), que son consideradas temperaturas favorables para los procesos de germinación de las semillas, iniciación foliar, crecimiento de la raíz, órganos aéreos de la planta e iniciación de la panícula (Sánchez *et al.*, 2014). Los valores de temperatura máxima y mínima también fueron favorables para la floración y fertilidad de las espiguillas (Jagadish *et al.*, 2007; Shah *et al.*, 2011), y el rendimiento de grano (Yoshida y Parao, 1976). Las temperaturas mayores a 35 °C causan esterilidad en las espiguillas, debido al efecto del calor durante la emergencia de la panícula (Cho y Oki, 2012).



**Figura 3.1. Promedio de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada cada 10 días durante el experimento en el ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos. Promedio del número de días a embuche (E), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).**

El suelo en el tratamiento de riego permaneció inundado durante todo el ciclo de crecimiento (datos no mostrados) y en el tratamiento de sequía, la disponibilidad de humedad edáfica varió conforme a la cantidad y distribución de la lluvia, registrándose periodos de sequía con reducciones en el contenido hídrico del suelo inferiores al PMP, al final de la fase vegetativa (50-60 dds), en la emergencia de la panícula (80 a 90 dds), en antesis y durante el periodo de llenado del grano (110-140 dds) (Figura 3.2). El mayor déficit hídrico se observó en el estrato de 0-20 cm, donde se concentra la mayor proporción de raíces (> 50 %) (López y Richards, 1994).



**Figura 3.2.** Contenido de humedad edáfica en los estratos de 0-20 y 20-40 cm en el tratamiento de sequía en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos. PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; CC= Capacidad de campo. Promedio del número de días a embuche (E), anthesis (A) y madurez fisiológica.

### 3.5.2 Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en riego

La variabilidad entre genotipos para rendimiento de grano y sus componentes fue muy amplia en condiciones de riego; el rango de variación para el rendimiento de grano, la biomasa aérea final, índice de cosecha, panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y granos por panícula fue 800 a 1606, 1858 a 3148, 43 a 53, 125 a 257, 15422 a 45538, 28 a 37 y 123 a 187, respectivamente; la mayor variación se observó en el rendimiento de grano, biomasa aérea y el número de granos  $m^{-2}$  (Cuadro 3.3). Los genotipos 2 y 7 obtuvieron los máximos rendimientos de grano, los cuales se explicaron por mayor producción de biomasa aérea y alto índice de cosecha y mayor número de granos  $m^{-2}$ ; estos genotipos expresaron mayor número de panículas y de granos  $m^{-2}$  y alto peso de mil granos, respectivamente (Cuadro 3.3). El rendimiento de grano y componentes fisiológicos del rendimiento en la variedad testigo fueron significativamente inferiores a las líneas experimentales. El desempeño mostrado por las Líneas 2 y 7 confirmó su comportamiento sobresaliente, observado en los ciclos de preselección (Cuadro 3.2). Belder *et al.*



(2004), determinaron que el rendimiento de grano en arroz bajo condiciones de inundación durante todo el ciclo de cultivo varió de 4.1 a 5 t ha<sup>-1</sup> y 6.8 a 9.2 t ha<sup>-1</sup> con dosis de fertilización de 0 y 180 kg de N ha<sup>-1</sup>, y temperatura promedio durante el ciclo de las plantas de 26.1, 26.7 y 27.2 °C en China y Filipinas; este rendimiento fue menor al obtenido en el presente estudio en Zacatepec, Morelos, México (12.3 t ha<sup>-1</sup>) con fertilización de 180-40-40 y temperatura promedio de 25 °C; las diferencias en rendimiento podrían deberse al mayor potencial genético de las líneas y resistencia a enfermedades en el germoplasma empleado aquí, a diferencia del utilizado en China y las Filipinas; además, de las condiciones locales de alta radiación y temperatura, y la aplicación de fósforo y potasio (Osuna *et al.*, 2000). El rango de variación genética en la densidad de raíces fue 0.22 a 0.29, 0.15 a 0.22, 0.08 a 0.12 y 0.4 a 0.9 cm cm<sup>-3</sup> en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm; 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 mayor densidad de raíces que los otros genotipos en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, respectivamente. La variedad testigo sólo tuvo alta densidad de raíces en los estratos de 0-15 y 30-50 cm (Cuadro 3.3). Adicionalmente, se determinó que la Línea 2 mostró la mayor densidad de raíces que las otras Líneas y el testigo en los estratos de 0 a 70 cm, lo que podría ser ventajoso para una mayor captura de agua y nutrientes del suelo. Kondo *et al.* (2003) señalaron que un sistema radical de mayor tamaño y mejor distribuido en el perfil del suelo, puede incrementar la productividad en arroz; las raíces en las capas profundas del suelo pueden asegurar la captura de agua cuando la humedad en las capas superficiales está agotada; mientras las raíces de las primeras capas del suelo tienen un papel importante en la captura eficiente de agua durante el proceso de recuperación después de un periodo seco y la captura de otros recursos como el nitrógeno.

**Cuadro 3.3. Promedios de rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de genotipo*	RG	BM	IC	P M <sup>-2</sup>	G M <sup>-2</sup>	PMG	G P	Densidad de raíces (cm cm <sup>-3</sup> )			
	(g m <sup>-2</sup> )	(g m <sup>-2</sup> )	(%)			(g)		0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
2	1606a	3148a	51a	257a	45538a	37a	177b	0.28a	0.17bc	0.09b	0.09a
7	1590a	3016a	53a	227b	42458a	33b	187a	0.22c	0.19ab	0.10ab	0.05b
3	1364b	2621b	52a	143c	18902de	31bc	132de	0.29a	0.16bc	0.12a	0.04b
6	1330b	2580bc	51a	143c	22061cd	32b	155c	0.29a	0.15bc	0.09ab	0.05b
5	1300b	2555bc	51a	142c	22682c	31bc	160c	0.23bc	0.22a	0.08b	0.04b
4	1207c	2380c	51a	130c	16871ef	29cd	130def	0.27ab	0.14c	0.09ab	0.06b
1	972d	1987d	49b	125c	15422f	28d	123f	0.28a	0.18ab	0.09ab	0.05b
8	890e	2009d	45b	230b	31864b	28d	139d	0.25abc	0.16bc	0.10ab	0.04b
9 (Testigo)	800f	1858d	43b	131c	16503ef	28d	126ef	0.28a	0.15bc	0.11a	0.05b
Media general	1229	2461	50	170	25811	31	148	0.26	0.16	0.10	0.05

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes (DMS, P≤0.05). \* Ver Cuadro 3.2. RG: rendimiento de grano; BM: biomasa aérea final; IC: índice de cosecha; P M<sup>-2</sup>: panículas m<sup>-2</sup>; G M<sup>-2</sup>: granos m<sup>-2</sup>; PMG: peso de mil granos; G P: granos por panícula.

### 3.5.3 Rendimiento de grano, sus componentes y densidad de raíces en sequía

En sequía el rendimiento de grano fue afectado severamente por el déficit hídrico (Cuadro 3.4), obteniéndose en promedio 638 g m<sup>-2</sup> vs. 1229 g m<sup>-2</sup> en riego (Cuadro 3.3). El rango de variación en el rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, panículas m<sup>-2</sup>, granos m<sup>-2</sup>, peso de mil granos y granos por panícula fue de 203 a 980, 1140 a 2372, 30 a 42, 92 a 129, 8290 a 15131, 21 a 26 y 90 a 118 (Cuadro 3.4). El índice de cosecha mostró un rango de variación más amplio en sequía (IC=30 a 42) que en riego (IC=43 a 53); el rendimiento de grano y el número de granos m<sup>-2</sup> fueron los caracteres con mayor variación fenotípica (Cuadro 3.4). De nueva cuenta, los genotipos 2 y 7 produjeron los más altos rendimientos de grano; que en gran medida se explicaron por mayor producción de biomasa aérea final, índice de cosecha y número de granos m<sup>-2</sup>; adicionalmente, la Línea 2 mostró alto número de panículas m<sup>-2</sup> y peso de mil granos, y la Línea 7 sobresalió por su alto número de granos por panícula (Cuadro 3.4). El índice de cosecha promedio de los genotipos 3, 6, 5 y 4 fue similar al de los genotipos 2 y 7. El rendimiento de grano y todos sus componentes en la variedad testigo fueron inferiores a las líneas experimentales. El alto rendimiento de grano de las líneas 2 y 7 confirmó su comportamiento sobresaliente, observado en los ciclos de preselección y en el tratamiento de riego del presente estudio (Cuadros 3.2 y 3.3). Xangsayasane *et al.* (2014) obtuvieron resultados similares al estudiar el comportamiento de 227 líneas experimentales de arroz en tres ambientes: sequía terminal, sequía intermitente y riego; sus resultados mostraron una reducción del rendimiento de 34 y 59 % en los tratamientos de sequía terminal y sequía intermitente con respecto a riego; la reducción en el rendimiento de grano, se asoció con una disminución en el porcentaje de granos llenos, índice de cosecha y el número de panículas m<sup>-2</sup>.

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<sup>-3</sup> en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm; las Líneas 4 y 8; 2 y 1; 2 y 5, y 2 y 9 (Testigo) tuvieron mayor densidad de raíces que los otros genotipos en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, respectivamente. La variedad testigo sólo tuvo alta densidad de raíces en el estrato de 50-70 cm (Cuadro 3.4). Las raíces tienen una función muy importante en el mantenimiento del equilibrio hídrico de la planta; en condiciones de déficit de humedad, el desequilibrio hídrico sobreviene cuando la tasa de transpiración de la planta es mayor que la tasa de absorción de las raíces (Boyer y Silk, 2004); en estas condiciones un sistema de raíces profundo y una alta capacidad de ajuste osmótico (Nguyen *et al.*, 1997; Gowda *et al.*, 2011); alto número de raíces nodales, mayor

peso específico de raíces y cociente raíz/parte aérea (Kondo *et al.*, 2003); alto peso seco y mayor longitud de raíz (Fageria y Moreira, 2011); máxima profundidad y longitud de raíz, peso seco de raíz, porcentaje de profundidad de raíz y cociente raíz/parte aérea (Feng *et al.*, 2012), se consideran todos, caracteres mayores de la resistencia a sequía en arroz.

**Cuadro 3.4. Promedios de rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de genotipo*	RG (g m <sup>-2</sup> )	BM (g m <sup>-2</sup> )	IC (%)	P M <sup>-2</sup>	G M <sup>-2</sup>	PMG (g)	G P	Densidad de raíces (cm cm <sup>-3</sup> )			
								0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
2	939a	2372a	40ab	129a	15045a	26a	117 <sup>a</sup>	0.35d	0.33a	0.21a	0.13a
7	980a	2350a	42a	128a	15131a	26a	118a	0.53abc	0.26bc	0.18bc	0.08d
3	698cb	1862b	37ab	121ab	12359b	21b	102bc	0.37bcd	0.22c	0.17c	0.09bcd
6	743b	1905bc	39ab	110c	11515bc	23b	104abc	0.38bcd	0.25c	0.18bc	0.07d
5	627cd	1725cd	37b	113bc	12557b	21b	111ab	0.36cd	0.26c	0.20ab	0.08d
4	621cd	1612d	38ab	116bc	12500b	21b	108ab	0.54ab	0.24c	0.18bc	0.11abc
1	385e	1309e	30c	92d	8290d	21b	90c	0.53abc	0.30ab	0.17c	0.09bcd
8	554d	1584d	35b	100d	9900cd	22b	99bc	0.57a	0.22c	0.18bc	0.09cd
9 (Testigo)	203f	1140f	18d	95d	11101bc	21b	118 <sup>a</sup>	0.47abcd	0.23c	0.17c	0.13a
Media general	638	1762	35	112	12044	22	107	0.45	0.26	0.18	0.10

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes (DMS, P≤0.05). \* Ver Cuadro 3.2. RG: rendimiento de grano; BM: biomasa aérea final; IC: índice de cosecha; P M<sup>-2</sup>: panículas m<sup>-2</sup>; G M<sup>-2</sup>: granos m<sup>-2</sup>; PMG: peso de mil granos; G P: granos por panícula.

### 3.5.4 Comparación riego vs sequía

Los genotipos respondieron de manera diferencial a la deficiencia hídrica del suelo; esta respuesta se mantuvo tanto en el rendimiento de grano y sus componentes como en la densidad de raíces. La sequía redujo el rendimiento y sus componentes fisiológicos y numéricos en los órganos aéreos de la planta, pero promovió mayor desarrollo del sistema radical (Cuadro 3.5). Los efectos negativos del estrés hídrico fueron más severos en el rendimiento de grano (48 %) y el número de granos  $m^{-2}$  (53 %) que en los otros componentes del rendimiento; número de panículas  $m^{-2}$ , índice de cosecha, peso de mil granos, biomasa aérea y granos por panícula con reducciones equivalentes a 34, 30, 29, y 28 % (Cuadro 3.5). En 20 líneas de arroz seleccionadas por alta biomasa aérea, sometidas a condiciones de inundación y secano en campo, se observó que la mayoría de los genotipos tuvieron un buen comportamiento en condiciones de inundación y sólo algunas líneas se comportaron bien en secano con estrés hídrico, mostrando una reducción significativa en altura de planta, número de macollos por planta, un mayor número de días a floración y biomasa aérea total en la madurez fisiológica (Kondhia *et al.*, 2015).

En contraste con lo observado en el rendimiento y sus componentes, la sequía aumentó la densidad de raíces con respecto a riego en todos los estratos del suelo desde 0-15 hasta 50-70 cm; la mayor concentración de raíces en promedio de todos los genotipos ocurrió en el estrato de 0-30 cm tanto en riego (74 %) como en sequía (72 %) (Cuadro 3.5). Fischer y Turner (1978) indicaron que las plantas bajo condiciones de sequía desarrollan un sistema de raíces más extenso que les permite una mayor exploración de la humedad en el suelo.

Kondo *et al.* (2003) estudiaron el desarrollo de las raíces en la etapa de floración en 11 genotipos de arroz en Filipinas; determinaron que los efectos genotípicos explicaron la mayor parte de la variación en el número de raíces nodales, peso específico de la raíz y cociente raíz/parte aérea, mientras el efecto ambiental fue relativamente grande para la profundidad de la raíz y el peso seco total de raíces. También en arroz, el crecimiento del sistema radical es influenciado por el nivel de nutrición y humedad en el suelo; el cultivar Wuyunging 24 sometido 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) en la Provincia de Jiangsu, China, mostró que el peso seco de raíces en los tratamientos de inundación continua y riego alternado con sequía moderada con 200 y 300  $kg$  de nitrógeno  $ha^{-1}$  fue mayor que en riego alternado con sequía severa y 100  $kg$  de nitrógeno  $ha^{-1}$  en la etapa de emergencia de la panícula; contrariamente, el cociente

raíz/parte aérea en el tratamiento de riego alternado con sequía severa y 100 kg de nitrógeno ha<sup>-1</sup> fue mayor que en los otros tratamientos, indicando que el crecimiento de la raíz en relación a la parte aérea, es menos inhibido en el tratamiento de riego alternado con sequía severa (Wang *et al.*, 2016).

**Cuadro 3.5. Promedios de rendimiento 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.**

Tratamiento de humedad	RG (g m <sup>-2</sup> )	BM (g m <sup>-2</sup> )	IC (%)	P M <sup>-2</sup>	G M <sup>-2</sup>	PMG (g)	G P	Densidad de raíces (cm cm <sup>-3</sup> )			
								Cm			
								0-15	15-30	30-50	50-70
Riego	1229a	2461a	50a	170a	25811a	31a	148a	0.3b	0.2b	0.1b	0.05b
Sequía	638b	1762b	35b	112b	12044b	22b	107b	0.5a	0.3a	0.2a	0.1 <sup>a</sup>

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes (DMS, P≤0.05). RG: rendimiento de grano (g m<sup>-2</sup>); BM: biomasa aérea final (g m<sup>-2</sup>); IC: índice de cosecha; P M<sup>-2</sup>: panículas m<sup>-2</sup>; G M<sup>-2</sup>: granos m<sup>-2</sup>; PMG: peso de mil granos; G P: granos por panícula.

### 3.5.5 Interacción genotipos x niveles de humedad del suelo

La interacción genotipos x niveles de humedad edáfica, se analizó en términos de la reducción del rendimiento y sus componentes, al comparar riego-sequía. El rendimiento de grano, la biomasa aérea y el número de granos m<sup>-2</sup> mostraron las mayores diferencias riego – sequía en promedio de todos los genotipos, seguidas por la biomasa aérea, panículas m<sup>-2</sup>, granos por panícula, altura de planta, índice de cosecha y peso de mil granos (Cuadro 3.6). Las Líneas 2, 7, 3, 6, 5, 4, 1 y el testigo para rendimiento de grano; el testigo para biomasa aérea e índice de cosecha; la Línea 2 para panículas m<sup>-2</sup>; las Líneas 2 y 7 para granos m<sup>-2</sup>; el genotipo 2 para peso de mil granos; la Línea 7 para granos por panícula; y el genotipo 5 para altura de planta, mostraron mayor diferencia riego – sequía (Cuadro 3.6). En otros estudios en arroz se observó que cuando la sequía ocurrió en la fase vegetativa sus efectos en las etapas subsecuentes de desarrollo y el rendimiento de grano fueron pequeños, pero cuando el déficit hídrico ocurrió durante el desarrollo de la panícula, el efecto fue más severo en el número de panículas m<sup>-2</sup> y espiguillas por panícula con un retraso significativo en la antesis y una reducción significativa en el porcentaje de granos llenos, lo cual se debió a una disminución en la producción de materia seca durante el periodo de sequía, así como durante el periodo de recuperación después de la sequía; cuando las deficiencias hídricas ocurrieron durante

el llenado del grano el porcentaje de granos llenos se redujo 40 % y el peso individual del grano 20 %, con una reducción de 30 % en el rendimiento de grano y reducción del número de días a madurez (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 respectivamente, mientras que en la época seca, el rendimiento disminuyó 34 % bajo sequía intermitente y 59 % en sequía terminal, concluyendo que la selección de genotipos tolerantes a sequía se puede lograr, al alternar la evaluación de los genotipos en sequía intermitente en la época seca y sequía terminal en la época lluviosa (Xangsayasane *et al.*, 2014).

La densidad radical mostró mayores diferencias riego – sequía en el estrato de 0-15 cm que en los demás estratos (Cuadro 3.6). La Línea 8; el genotipo 2; y el testigo, mostraron mayor aumento en la densidad de raíces en todos los estratos (0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm) que los demás genotipos, respectivamente (Cuadro 3.6). Una mayor acumulación de biomasa en las raíces puede contribuir a un mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso del agua en los sistemas agrícolas de secano; el mayor tamaño del sistema radical de la planta depende de una mayor densidad de raíces, área de la superficie total de absorción y área activa de la superficie de absorción de las raíces (Chu *et al.*, 2014). Kijoji *et al.* (2014) observaron que un grupo de líneas derivadas de las cruces entre *Oryza sativa* (IR64) y *O. glaberrima* (RAM90 y RAM54), mostraron mayor rendimiento de grano en riego y sequía comparados con el progenitor recurrente IR64 (susceptible a sequía), y menor temperatura del dosel bajo sequía; adicionalmente, observaron que la densidad de raíces estuvo negativamente asociada con la temperatura del dosel y el contenido de humedad en el suelo, y que la relación entre la densidad de raíces y el rendimiento de grano en campo, sólo fue consistente en algunas líneas, lo que confirmó la compleja relación 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.



**Cuadro 3.6. Promedios de la diferencia riego – sequía para el rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en distintos estratos del suelo. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de genotipo*	RG	BM	IC	P M <sup>-2</sup>	G M <sup>-2</sup>	PMG	G P	Densidad de raíces (cm cm <sup>-3</sup> )			
	(g m <sup>-2</sup> )	(g m <sup>-2</sup> )	(%)			(g)		0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
2	667a	776a	11cd	128a	30493a	11.3a	61ab	0.07c	0.16a	0.13a	0.05bc
7	610a	666a	11cd	99b	27327a	6.7cd	69a	0.31a	0.07cd	0.08c	0.03bc
3	666a	759a	15bc	22cd	6544e	10.0abc	30ef	0.08c	0.05d	0.06c	0.05bc
6	586a	675a	13cd	32c	10547c	9.3abcd	50bc	0.09c	0.10bc	0.08bc	0.03c
5	673a	830a	14cd	29cd	10126cd	10.6ab	49bcd	0.13bc	0.03d	0.11ab	0.04bc
4	587a	767a	12cd	14d	4371e	8.0abcd	22fg	0.27ab	0.09bcd	0.09abc	0.05ab
1	587a	678a	19ab	33c	7132de	7.3bcd	33def	0.25abc	0.12ab	0.07c	0.05bc
8	336b	426b	10d	130a	21964b	6.0d	39cde	0.32a	0.06cd	0.08bc	0.06ab
9 (Testigo)	596a	718a	22a	36c	5402e	7.7bcd	8.3 g	0.19abc	0.07cd	0.06c	0.08a
Media general	589	699	14	58	13767	8.5	40	0.18	0.085	0.083	0.048

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ). \* Ver Cuadro 3.2. RG: rendimiento de grano; BM: biomasa aérea final; IC: índice de cosecha; P M<sup>-2</sup>: panículas m<sup>-2</sup>; G M<sup>-2</sup>: granos m<sup>-2</sup>; PMG: peso de mil granos; G P: granos por panícula.

### 3.5.6 Relación entre el rendimiento de grano y sus componentes

El rendimiento de grano se relacionó positiva y significativamente con sus componentes: biomasa aérea, índice de cosecha, número de panículas  $m^{-2}$  y granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y número de granos por panícula en promedio de todos los genotipos (Cuadro 3.7). La biomasa aérea se relacionó positiva y significativamente con el índice de cosecha, número de panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , y peso de mil granos; el índice de cosecha estuvo positiva y significativamente relacionado con el número de panículas  $m^{-2}$  con granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y granos por panícula; el número de panículas  $m^{-2}$  se relacionó positiva y significativamente con el número de granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y granos panícula; el número de granos  $m^{-2}$  estuvo positiva y significativamente asociado con el peso de mil granos y granos por panícula; el peso de mil granos se relacionó significativamente con el número de granos por panícula (Cuadro 3.7).

**Cuadro 3.7. Coeficientes de correlación entre el rendimiento de grano y sus componentes, calculados con los datos promedio de riego y sequía, para todos los genotipos. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

Variables	RG	BM	IC	P M <sup>-2</sup>	GM <sup>-2</sup>	PMG	G P
RG	-	0.97**	0.84**	0.66**	0.74**	0.82**	0.73**
BM	-	-	0.76**	0.82**	0.69**	0.73**	0.28ns
IC	-	-	-	0.43*	0.47*	0.54**	0.45*
P M <sup>-2</sup>	-	-	-	-	0.96**	0.75**	0.70**
GM <sup>-2</sup>	-	-	-	-	-	0.83**	0.85**
PMG	-	-	-	-	-	-	0.76**
G P <sup>-1</sup>	-	-	-	-	-	-	-

RG: rendimiento de grano ( $g m^{-2}$ ); BM: biomasa aérea final ( $g m^{-2}$ ); IC: índice de cosecha (%); P M<sup>-2</sup>: panículas  $m^{-2}$ ; G M<sup>-2</sup>: granos  $m^{-2}$ ; PMG: peso de mil granos (g); G P: granos por panícula.

Manickavelu *et al.* (2006) consideraron que la correlación entre el rendimiento y otras características de la planta, deben considerarse por los fitomejoradores, para combinar alto rendimiento y tolerancia a sequía, al aplicar presión de selección en el contenido relativo de agua, longitud de la panícula, granos por panícula, índice de cosecha, biomasa aérea, cociente raíz/parte

aérea y densidad radical en dirección positiva, y bajos valores de enrollamiento de la hoja, secamiento de la hoja y tasa de recuperación a la sequía; también, señalaron que el análisis de caracteres cuantitativos para tolerancia a sequía, rendimiento y sus componentes permitió identificar 38 regiones asociadas con caracteres de tolerancia a sequía y rendimiento; de estas, 18 regiones estuvieron estrechamente relacionadas con marcadores de ADN que podrían utilizarse en la selección asistida por marcadores moleculares en el mejoramiento de la tolerancia a sequía en arroz. Otros caracteres de la planta que podrían utilizarse exitosamente en la selección de genotipos con alto rendimiento de grano y tolerancia a sequía son la biomasa aérea y granos  $m^{-2}$ ; en cebada en condiciones de riego, sequía y temporal en México, se determinó que el rendimiento de grano estuvo positiva y significativamente relacionado con la biomasa aérea y granos  $m^{-2}$ ; 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 número de granos  $m^{-2}$  (López-Castañeda, 2011).

### 3.6 CONCLUSIONES

El rendimiento de grano promedio de las dos líneas sobresalientes (2 y 7) en riego ( $16 t ha^{-1}$ ) y sequía ( $9.6 t ha^{-1}$ ) fue más alto que el rendimiento promedio nacional en riego ( $6.4 t ha^{-1}$ ) y en sequía ( $3.8 t ha^{-1}$ ), lo cual las hace, fuertes candidatas para ser liberadas como variedades comerciales. Estas Líneas mostraron un comportamiento similar en riego y sequía con alta producción de biomasa aérea, índice de cosecha y granos  $m^{-2}$ ; la Línea 2, además de tener altos promedios en estos componentes, mostró alto número de panículas  $m^{-2}$  y peso de mil granos, y la Línea 7 mostró alto número de granos por panícula en riego y sequía; adicionalmente, la Línea 2 mostró mayor densidad de raíces en los estratos de 0 a 70 cm en riego y mayor densidad radical en los estratos de 15 a 70 cm en sequía. Los componentes biomasa aérea, índice de cosecha, panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y granos por panícula mostraron una relación estrecha con el rendimiento en riego y sequía. Los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada, en el sentido de que las líneas con mayor producción de biomasa en sus órganos aéreos y raíces obtuvieron los mayores rendimientos de grano en riego y sequía. Las Líneas más promisorias podrían utilizarse como progenitores en los programas de mejoramiento y como variedades comerciales en los sistemas de producción en riego y sequía.

### 3.7 LITERATURA CITADA

- Belder, P., B. A. M. Bouman, R. Cabangon, L. Guoan, E. J. P. Quilang, L. Yuanhua, J. H. J. Spiertz, and T. P. Tuong. 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agric. Water Manage.* 65: 193–210.
- Blum, A. 2011. *Plant Breeding for Water-limited Environments*. Springer, New York, NY, USA. 255 p.
- Boonjung, H., and S. Fukai. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 1. Growth during drought. *Field Crops Res.* 48: 37-45.
- Boyer, J. S., and W. K. Silk. 2004. Hydraulics of plant growth. *Funct. Plant Biol.* 31: 761-773.
- Châtel, 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, CO<sub>2</sub> in rice growth models. *Rice* 5: 10.
- 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.
- Esqueda E, V. A., O. H. Tosqui V., y D. Flores M. 2010. Control de malezas en el cultivo del arroz de temporal en Veracruz. Folleto Técnico No. 53. Campo Experimental Cotaxtla, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, INIFAP. Veracruz, México. 41 p.
- 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, F., X. 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.

- Fischer, R. A., and N. C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29: 277-317.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 217 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.
- Jagadish, S.V. K., P. Q. Craufurd, and T. R. Wheeler. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 58: 1627–1635.
- Jiménez C, J. A., A. V. Esqueda E., y R. López L. 2014. Tecnología disponible para producir arroz en Tabasco. Folleto Técnico No. 78. Campo Experimental Huimanguillo, Huimanguillo, Tabasco, México. 23 p.
- 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.* 25: 189-200.
- 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.

- López-Castañeda, C. 2013. Resistencia a sequía en trigo. *In*: Cruz-Izquierdo S.; Ayala-Garay O. J.; Cruz-Huerta N.; Ramírez-Ramírez I.; Martínez-Villegas E. (eds.). 2013. Avances de Investigación 2012. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad - Genética. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. pp: 35-39.
- López-Hernández, M. B., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, S. Miranda-Colín, E. Barrios-Gómez, V. H. Aguilar Rincón y C. G. Martínez-Rueda. 2016. Rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en arroz bajo riego y sequía. *In*: Memorias del 5° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas. 29-30 de septiembre de 2016. Universidad Autónoma Chapingo. pp: 423-436.
- 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.
- Manickavelu, A., N. Nadarajan, S. K. Ganesh, R. P. Gnanamalar, and R. C. Babu. 2006. Drought tolerance in rice: morphological and molecular genetic consideration. *Plant Growth Regul.* 50: 121-138.
- Nguyen, H. T., R. C. Babu, and A. Blum. 1997. Breeding for drought resistance in rice: physiology and molecular genetics considerations. *Crop Sci.* 37: 1426-1434.
- 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. 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.
- Pantuwan, G., S. Fukai, M. Cooper, S. Rajatasereekul, and J. C. O’Toole. 2002. Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to drought under rainfed lowlands: 2. Selection of drought resistant genotypes. *Field Crops Res.* 73: 169–180.
- Passioura, J. B. and J. F. Angus. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106: 37-75.
- SAGARPA. 2015. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <http://www.sagarpa.gob.mx> (Consulta de datos estadísticos para el año 2015; Julio 29, 2016).

- 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 release 9.1 for Windows. Cary, North Carolina, United States: SAS Institute, Inc.
- 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.
- 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.
- Yoshida, S., and F. T. Parao. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. *In: Climate and Rice.* International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines. pp: 471-494.

## CAPÍTULO IV. TOLERANCIA A SEQUÍA Y CALOR EN ARROZ

### 4.1 RESUMEN

La sequía con frecuencia es acompañada de temperaturas altas, que exacerban sus efectos sobre la fisiología de la planta de arroz y reducen considerablemente los rendimientos de grano a nivel de cultivo. El presente estudio tuvo como objetivos: (i) evaluar la variabilidad genética en temperatura de dosel ( $T_c$ ) y depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal ( $DT_c$ ) e índices de productividad media (IPM), susceptibilidad (ISS) y tolerancia a sequía (ITS) en riego (R) y sequía intermitente (SI) durante la floración y llenado del grano, y (ii) determinar el efecto de  $T_c$  sobre el rendimiento de grano (RG) y sus componentes. Se incluyeron ocho líneas  $F_6$  provenientes del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR, Palmira, Colombia) y una variedad nacional. La siembra se realizó el 10 de junio de 2013, con una densidad de siembra de 100 kg de semilla  $ha^{-1}$  y una dosis de fertilización de 180-40-40. La temperatura del aire ( $T_a$ ) se relacionó estrechamente con  $T_c$ ;  $T_c$  aumentó 0.8 °C por cada 1°C de aumento en  $T_a$  en R y 1°C por cada 1°C en SI.  $T_c$  en SI fue más alta que en R en el periodo de floración y llenado del grano. Así mismo,  $T_c$  se asoció positivamente con el ISS para rendimiento de grano ( $ISS_{RG}$ ), biomasa aérea ( $ISS_{BM}$ ) e índice de cosecha ( $ISS_{IC}$ ); los genotipos con alta  $T_c$  mostraron mayor  $ISS_{RG}$ ,  $ISS_{BM}$  e  $ISS_{IC}$ . El IPM e ITS se relacionaron negativamente con  $T_c$ ; los genotipos con alta  $T_c$  exhibieron mayor IPM e ITS.  $DT_c$  fue más baja en SI que en R en floración y llenado del grano; la  $DT_c$  se relacionó positiva y significativamente con RG en R y SI; los genotipos con mayor  $DT_c$  mostraron mayor RG en R y SI.  $T_c$  disminuyó el RG 25 %, BM 33 %, granos  $m^{-2}$  15 %, panículas  $m^{-2}$  13 %, granos por panícula 9.6 % y peso de mil granos 7 %, por cada 1°C de aumento en  $T_c$  en promedio de todos los genotipos en R y SI. Los genotipos con mayor tolerancia a sequía y calor mostraron mayor RG y sus componentes.

**Palabras clave:** Depresión de la temperatura del dosel vegetal, índices de productividad media, índice de susceptibilidad, índice de tolerancia a sequía, temperatura del dosel vegetal.



## CHAPTER 4. DROUGHT AND HEAT TOLERANCE IN RICE

### 4.2. ABSTRACT

Drought is quite often accompanied by high temperatures that exacerbate its effects on the physiology of the rice plant, reducing significantly its grain yield. This study was conducted: (i) to evaluate genetic variability in canopy temperature ( $T_c$ ), canopy temperature depression ( $DT_c$ ) and mean productivity (MPI), drought susceptibility (DSI) and drought tolerance (DTI) indices in irrigation (I) and intermitent drought (ID) conditions, and (ii) to determine the effect of  $T_c$  in grain yield (GY) and its components. Eight  $F_6$  lines from the Latin American Fund for Irrigated Rice (FLAR, Palmira, Colombia) and a national variety were included. The experiment was planted in June 10, 2013 by using a seeding rate of  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  and a fertilizer rate of 180-40-40. Air temperature ( $T_a$ ) was strongly associated with  $T_c$ ;  $T_c$  increased  $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$  for each  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  increase in  $T_a$  in I and  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  for each  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  increase in  $T_a$  in ID.  $T_c$  in ID was higher than in I at flowering and grain filling.  $T_c$  was also positively related to DSI for grain yield ( $DSI_{GY}$ ), aerial biomass ( $DSI_{BM}$ ) and harvest index ( $DSI_{HI}$ ); genotypes with high  $T_c$  showed greater  $DSI_{GY}$ ,  $DSI_{BM}$  and  $DSI_{HI}$ .  $T_c$  was negatively associated with MPI and DTI; genotypes with high  $T_c$  exhibited higher MPI and DTI.  $DT_c$  was lower in ID than in I at flowering and grain filling;  $DT_c$  was positively and significantly related to GY in ID and I; genotypes with greater  $DT_c$  showed greater GY in ID and I.  $T_c$  reduced GY 25 %, aerial biomass (BM) 33 %, grains  $\text{m}^{-2}$  ( $G \text{ M}^{-2}$ ) 15 %, panicles  $\text{m}^{-2}$  ( $P \text{ M}^{-2}$ ) 13 %, grains per panicle (G P) 9.6 % and thousand grain weight (TGW) 7 % for each  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  increase in  $T_c$  averaged over genotypes in ID and I. Genotypes with greater drought and heat tolerance showed higher grain yield and yield components.

**Keywords:** Canopy temperature, canopy temperature depression, mean productivity index, drought susceptibility index, drought tolerance index.

### 4.3 INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico causa reducciones considerables en el rendimiento de grano de arroz, incluso en ambientes con clima favorable, debido a periodos de precipitación insuficiente para satisfacer las demandas de evapotranspiración del cultivo. Con frecuencia el estrés hídrico viene acompañado de temperaturas altas que exacerbaban sus efectos en los procesos fisiológicos de la planta; el estrés hídrico causa cierre parcial de estomas, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de la planta expuesta a la radiación solar (Jackson *et al.*, 1981). Esta respuesta de la planta se manifiesta a través de incrementos en la tasa transpiratoria para mitigar la evaporación directa del agua producida por la elevación en la temperatura del aire.

El estrés por alta temperatura es relativamente predecible en algunas regiones (por ej., partes del sur de Asia y África Sub-Sahariana), al aumentar lentamente a lo largo del día permite a las plantas adaptarse al medio; sin embargo, en otras regiones el estrés por calor puede ocurrir súbitamente y estar acompañado de vientos desecantes (por ej., Las Grandes Planicies en los Estados Unidos de Norte América o Norte de África) (Reynolds *et al.*, 2010). En regiones tropicales una dimensión adicional es la humedad relativa que puede exacerbar el efecto del estrés por calor en dos formas: (i) el aire saturado reduce el potencial para el enfriamiento evaporativo de los órganos de la planta y (ii) está acompañado de altas temperaturas nocturnas (Reynolds *et al.*, 2010). Al considerar que las temperaturas óptimas para el crecimiento de diferentes especies cultivadas están razonablemente definidas y varían de los 15 °C para trigo a los 20-25 °C para arroz, maíz, sorgo y soya (CCSP, 2009), se puede inferir que la temperatura del aire no es necesariamente un indicador del estrés que experimentan las plantas; específicamente en ambientes con baja humedad relativa, la temperatura de la planta puede estar algunos grados por debajo de la temperatura del aire, asumiendo que hay suficiente disponibilidad de agua en el suelo para satisfacer la demanda evaporativa (Amani *et al.*, 1996). Por lo tanto, el estrés por calor que experimenta la planta deberá ser función no únicamente de la temperatura del aire, sino también de factores genéticos y agronómicos que determinan el potencial de enfriamiento evaporativo de la planta (Reynolds *et al.*, 2010). Los factores genéticos que mayor influencia tienen en el calentamiento de la planta son: la cubierta o dosel vegetal, arquitectura del dosel, conductancia estomática, composición de pigmentos, cera epicuticular, crecimiento de la raíz, señales del sistema radical y fenología, y los factores agronómicos más importantes son: fecha de siembra, método de siembra (surcos o melgas, espaciado), riego, sistema de cultivo, manejo de residuos, control de malezas, plagas y

enfermedades (Reynolds *et al.*, 2010). Un aumento en la temperatura del ambiente de 5-10 °C en el corto plazo, puede tener efectos catastróficos para el rendimiento, especialmente si ocurre en etapas críticas de desarrollo; esta sensibilidad a la temperatura no es exclusiva de los cultivos de climas templados, también se puede observar en cultivos relativamente adaptados a condiciones cálidas como arroz (Reynolds *et al.*, 2010). No obstante, que la menor variación genética ha sido explotada en condiciones de campo en regiones altas, un aumento en el diámetro y la profundidad y/o ramificación del sistema radical se han asociado con una disminución en el estrés hídrico de la planta y un mayor rendimiento de grano en condiciones de sequía severa (Lafitte y Curtois, 2002).

El cambio climático está aumentando la temperatura nocturna en mayor proporción que la diurna en las áreas donde se cultiva arroz; un estudio realizado con genotipos de arroz en condiciones controladas mostró que las temperaturas altas nocturnas redujeron la fertilidad de las espiguillas, peso del grano por panícula, contenido de amilosa y consistencia del gel, mientras las temperaturas altas durante el día sólo redujeron la consistencia del gel; también se observó que los cultivares con espiguillas más frescas (con menor temperatura) exhibieron mayor fertilidad; un menor número de días a antesis y menor duración del periodo entre emergencia de la panícula y antesis, son caracteres que pueden ser útiles para el mejoramiento y la resiliencia en climas cálidos (Coast *et al.*, 2014). Las variedades de arroz con sistema radical más profundo muestran menor esterilidad de las espiguillas en zonas con temperaturas del aire altas, al presentar temperatura de área foliar más baja como resultado de una mayor tasa transpiratoria (IRRI, 1983). Hirayama *et al.* (2006) observaron que variedades de arroz de tierras altas con sistemas de raíces más profundas exhibieron temperaturas de la hoja más bajas y que la temperatura del dosel estuvo correlacionada con las tasas de transpiración y fotosíntesis. Líneas con altos rendimientos de grano en condiciones de estrés hídrico produjeron plantas altas con panículas más densas y granos bien formados, y con menor esterilidad de las espiguillas; también se observó correlación positiva entre la temperatura del dosel y la esterilidad de las espiguillas, y una correlación negativa entre la temperatura de la hoja y el peso de 100 granos, altura de planta, fertilidad de los macollos, y rendimiento de grano (Guimarães *et al.*, 2010). Otro estudio en arroz mostró que menor contenido de humedad en el suelo, se reflejó en menor número de granos llenos y rendimiento de grano (Wen-Zhong *et al.*, 2007).

Por otra parte, la depresión o abatimiento de la temperatura de la hoja es influenciada por varios factores fisiológicos (conductancia estomática, sistema vascular efectivo para la

transpiración de agua y transporte de nutrientes y asimilados, y la aptitud del genotipo para asignar asimilados al grano, al tener una mejor asociación con el rendimiento y número de granos  $m^{-2}$  que con la biomasa) lo que la hace una característica integrativa poderosa, pero en uso, puede ser afectada por factores ambientales como el contenido hídrico del suelo, temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar (Reynolds *et al.*, 2001). Por su naturaleza genética la depresión de la temperatura se expresa mejor en condiciones de alto déficit de presión de vapor, baja humedad relativa y alta temperatura (Amani *et al.*, 1996). En estos ambientes se ha mostrado que la depresión de la temperatura del dosel estuvo estrechamente relacionada con la conductancia estomática y la tasa fotosintética; las variedades con menor temperatura de la hoja, muestran mayor conductancia estomática y tasa fotosintética (Takai *et al.*, 2010).

La capacidad de producir sistemas radicales más extensos es un carácter adaptativo con buen potencial para aumentar la productividad en ambientes con sequía y alta temperatura, sobre todo donde hay humedad disponible en estratos inferiores del suelo; por ejemplo, en ambientes de sequía terminal, donde la humedad del subsuelo es retenida durante el periodo de llenado del grano y es utilizada más eficientemente para el crecimiento del grano (Kirkegaard *et al.*, 2007). La medición de las características de crecimiento del sistema radical no es práctica común en programas de mejoramiento genético para resistencia a sequía, en su lugar, la medición de la temperatura del dosel permite estimar la cantidad de agua capturada por el sistema radical con relativa facilidad; la temperatura del dosel medida durante periodos de estrés extremo está asociada con el 50 % de la variación en la capacidad de extracción de humedad en estratos inferiores a 60 cm de profundidad (Reynolds *et al.*, 2007) y directamente relacionada con la profundidad de raíces (Lopes y Reynolds, 2010). Las mediciones de temperatura del dosel en líneas recombinantes de trigo, confirmaron el potencial para lograr ganancias genéticas significativas en rendimiento, al utilizar la temperatura del dosel como criterio indirecto de selección, logrando explicar el 50 % o más de la variación en rendimiento de grano bajo sequía (Olivares-Villegas *et al.*, 2007) y estrés por calor (Amani *et al.*, 1996; Pinto *et al.*, 2010). Un análisis económico del empleo de la temperatura del dosel como criterio indirecto de selección confirmó un aumento en la eficiencia en el mejoramiento genético (Brennan *et al.*, 2007) y la identificación de algunos *loci* de caracteres cuantitativos para la temperatura del dosel (Pinto *et al.*, 2010). A la fecha no existen trabajos de investigación que utilicen la temperatura del dosel vegetal, para la selección de genotipos con buen comportamiento agronómico en condiciones de secano con estrés hídrico en México, por lo que el presente estudio

podría ser de gran utilidad en la selección de genotipos mejor adaptados a condiciones de estrés hídrico y calor.

Los objetivos del presente estudio fueron: (i) evaluar la variabilidad genética en temperatura y depresión de la temperatura del dosel vegetal e índices de productividad, susceptibilidad y tolerancia a sequía en condiciones de riego y déficit hídrico intermitente durante la floración y el periodo de llenado del grano, y (ii) determinar el efecto de la temperatura del dosel vegetal ( $T_c$ ) en el rendimiento y sus componentes.

## **4.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.4.1 Sitio experimental, material genético, tratamientos y diseño experimental**

La descripción del sitio experimental, las características físicas y químicas del suelo, el material genético y diseño experimental, y los tratamientos de humedad edáfica utilizados, así como los detalles del manejo agronómico del experimento de campo, se presentan en el Capítulo anterior de esta tesis.

### **4.4.2 Variables de estudio**

Temperatura del dosel vegetal o del cultivo ( $T_c$ , °C); se midió en cada unidad experimental en riego y sequía entre las 12:00 y 15:00 horas con un termómetro infrarrojo (Modelo Raytek Spectrum Technologies, Inc.), en un ángulo aproximado de 45 ° y a una distancia de 30 cm del dosel de las plantas, cada tercer día desde los 58 a los 119 dds (Pietragalla, 2013).

Temperatura del aire ( $T_a$ , °C); se midió simultáneamente con la temperatura del dosel, al colocar un termómetro de máxima y mínima de columna de mercurio (Marca Brennan, England) junto a las plantas, para estimar la temperatura del aire que rodeaba el dosel vegetal (Barrios-Gómez *et al.*, 2011).

Depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal ( $DT_c$ , °C); se calculó como la diferencia entre la  $T_a$  y  $T_c$ .

El rendimiento de grano (RG), biomasa aérea (BM), número de panículas  $m^{-2}$  ( $P M^{-2}$ ) y granos  $m^{-2}$  ( $G M^{-2}$ ), granos por panícula (G P) y peso de mil granos (PMG), se midieron conforme a lo descrito en el Capítulo anterior de esta tesis.

Índice de susceptibilidad a sequía (ISS) para el rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha se calcularon de acuerdo con Fischer y Maurer (1978):  $ISS = 1 - (Y_s / Y_p) / 1 - (\bar{Y}_s /$

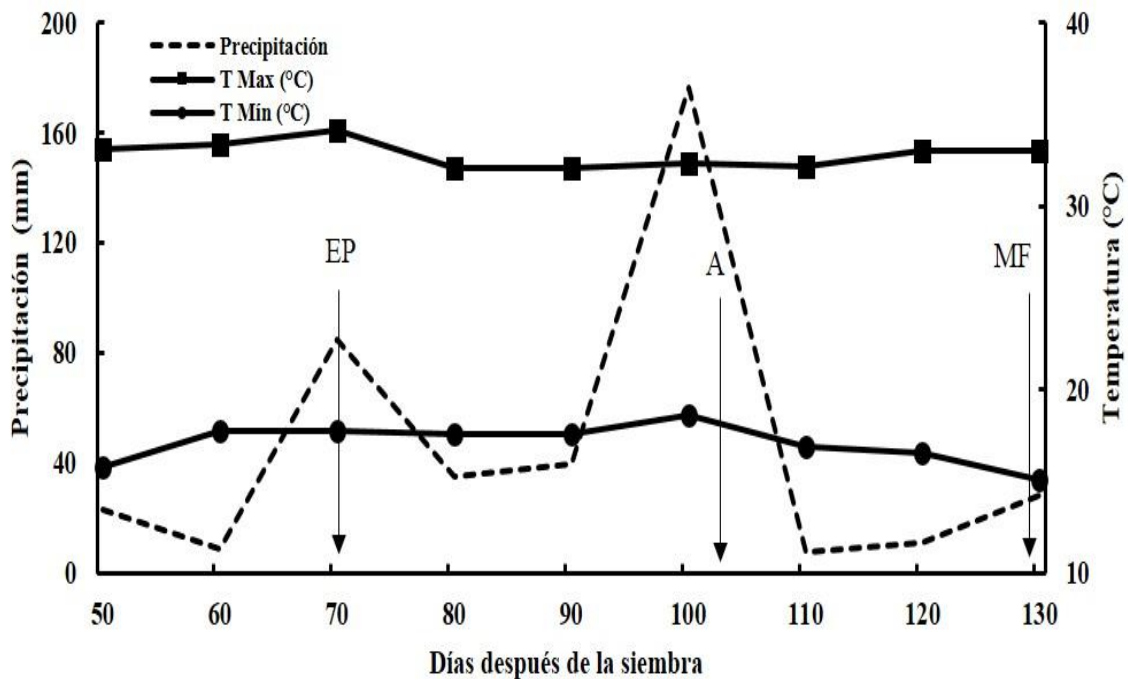
$\bar{Y}_p$ ), donde  $Y_s$  es el rendimiento de los genotipos en sequía,  $Y_p$  el rendimiento en riego y  $\bar{Y}_s$  y  $\bar{Y}_p$ , presentan el rendimiento promedio en sequía y riego; los genotipos con  $ISS < 1$  se consideran más resistentes al estrés hídrico.

Productividad media (PM); es el promedio del rendimiento en riego y sequía  $PM = (Y_p + Y_s) / 2$ ; los genotipos con altos valores de PM son los más deseables para ambientes con deficiencias hídricas (Rosielle y Hamblin, 1982).

Índice de resistencia a sequía (IRS); se calculó de acuerdo la expresión:  $IRS = Y_s (Y_s / Y_p) / \bar{Y}_p$ ;  $Y_s$  es el rendimiento de los genotipos en sequía,  $Y_p$  el rendimiento en riego y  $\bar{Y}_s$  y  $\bar{Y}_p$ , presentan el rendimiento promedio en sequía y riego; los genotipos con alto IRS son apropiados para condiciones de estrés hídrico (Ashraf *et al.*, 2015).

#### **4.4.3 Datos meteorológicos**

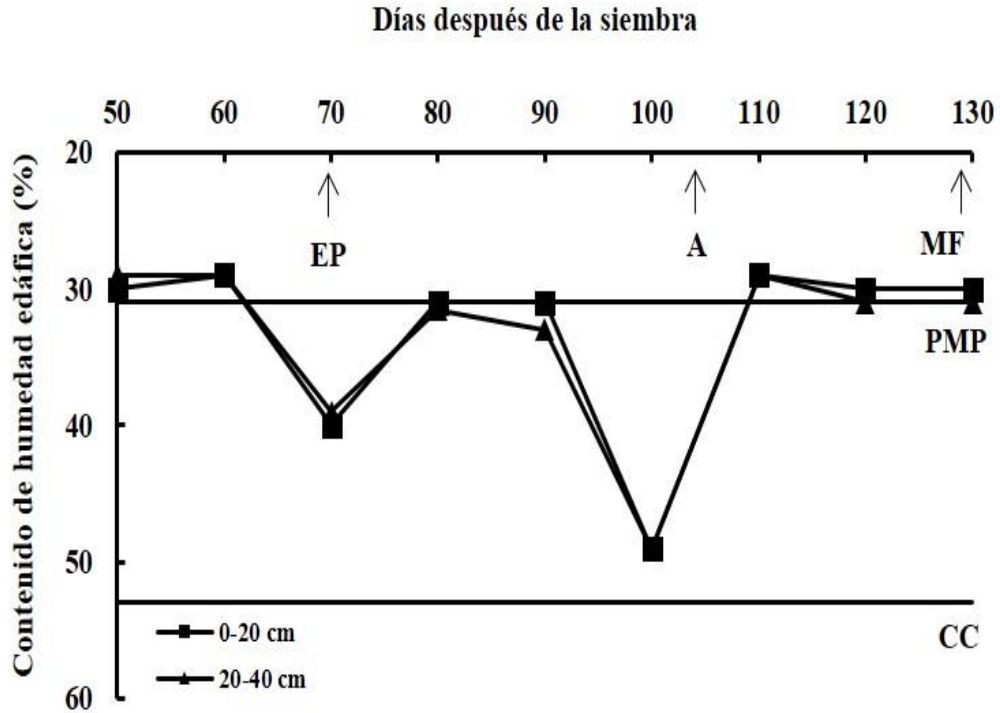
Los datos meteorológicos del sitio en que se realizó el presente estudio, también se presentan en el Capítulo anterior de esta tesis. Aquí se presentan datos de temperatura y lluvia (Figura 4.1), sólo para el periodo de tiempo en el que se colectaron datos de temperatura del dosel vegetal en riego y sequía (58 a 119 dds).



**Figura 4.1. Promedio de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación acumulada cada 10 días, durante el periodo de medición de la temperatura del dosel vegetal (58-119 dds) en el ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.** Promedio del número de días a emergencia de la panícula (EP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).

#### 4.4.4 Contenido hídrico del suelo

El contenido hídrico edáfico en el tratamiento de sequía también se presentó en el Capítulo anterior de esta tesis. Aquí sólo se presentan datos para el periodo de tiempo en el que se colectaron datos de temperatura del dosel vegetal en riego y sequía (58 a 119 dds) (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Contenido de humedad edáfica en los estratos de 0-20 y 20-40 cm en el tratamiento de sequía durante el periodo de medición de la temperatura del dosel vegetal (58-119 dds) en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos. PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; CC= Capacidad de campo. Promedio del número de días a emergencia de la panícula (EP), antesis (A) y madurez fisiológica (MF).

#### 4.4.5 Análisis estadístico

Para cada tratamiento de humedad edáfica se realizaron análisis de varianza para todas las variables medidas y en forma combinada, para determinar la significancia de la interacción genotipo x ambiente a través del procedimiento GLM del paquete estadístico SAS, Versión 9.1, para Windows (SAS, 2009). La comparación de medias se realizó con la prueba de la diferencia mínima significativa ( $p \leq 0.05$ ).

### 4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.5.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico detectó diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre genotipos para la temperatura del dosel vegetal ( $T_c$ , °C) en riego y sequía en todas las mediciones realizadas entre los 58 y 119 dds (Cuadro 4.1A). También se observaron diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre genotipos dentro



de los dos tratamientos de humedad analizados en forma conjunta, excepto para las mediciones realizadas a los 74, 76 y 95 dds, en las que solo se observaron diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos. El análisis de varianza combinado riego-sequía también detectó diferencias ( $p \leq 0.01$ ) para la interacción: niveles de humedad edáfica x genotipos en la mayoría de fechas de medición, a excepción de las mediciones realizadas a los 62 y 88 dds (Cuadro 4.1 A).

La variabilidad en  $T_c$  entre genotipos en sequía fue mayor que en riego; el rango de variación de  $T_c$  en riego fue de 22 a 29.9 °C y 27 a 36.5 °C en sequía. En general, el coeficiente de variación fue bajo en los dos niveles de humedad edáfica (Cuadro 4.1 A).

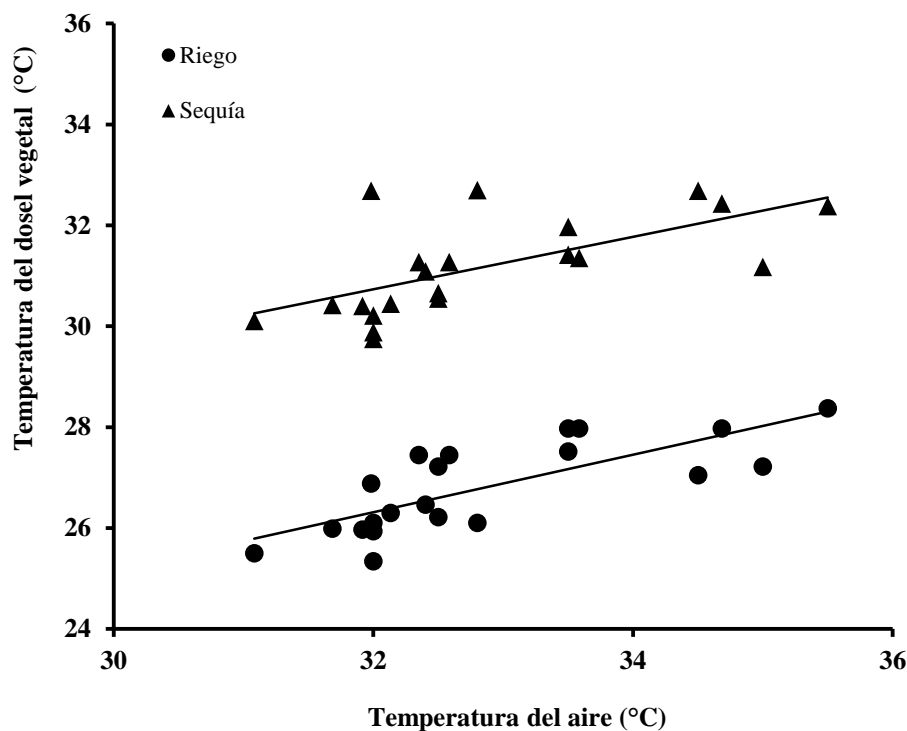
El análisis de varianza para la depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal ( $DT_c$ , °C) mostró diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre genotipos en riego y sequía, en todas las mediciones realizadas entre los 58 y 119 dds (Cuadro 4.2A). También mostró diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre genotipos dentro de los dos tratamientos de humedad analizados en forma conjunta en todas las mediciones realizadas, excepto a los 74, 76 y 95 dds, en las que solo se observaron diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos (Cuadro 4.2A); el análisis de varianza también detectó efectos significativos ( $p \leq 0.01$ ) para la interacción niveles de humedad edáfica x genotipos en la mayoría de fechas de medición, a excepción de las mediciones realizadas a los 62, 68 y 88 dds en las que no se detectaron diferencias significativas entre genotipos (Cuadro 4.2A).

El rango de variación en depresión de la temperatura fue de 1.9 a 10.5 °C en riego y de 0.1 a 7.5 en sequía; el coeficiente de variación tendió a ser más alto en sequía que en riego (Cuadro 4.2A).

Los datos promedio de  $T_c$  y las medias de la  $DT_c$  para riego y sequía se presentan en los Cuadros 4.3A y 4.4A, y 4.5A y 4.6A, respectivamente.

#### **4.5.2 Temperatura del dosel vegetal y temperatura del ambiente**

La temperatura del dosel vegetal en riego ( $T_{cR}$ ) se relacionó positiva y significativamente con la temperatura del aire ( $T_a$ ).  $T_{cR} = 0.8 (T_a) + 8.1$ ,  $r = 0.64$ ,  $P \leq 0.01$ ) y sequía ( $T_{cS} = 1.02 (T_a) + 5.5$ ,  $r = 0.77$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 4.3).  $T_c$  aumentó 0.8 °C por cada 1 °C de aumento en la temperatura del ambiente en riego, mientras en sequía,  $T_c$  aumentó 1 °C por cada 1 °C de aumento en la temperatura del aire (Figura 4.3).



**Figura 4.3 Relación entre temperatura del aire y temperatura del dosel vegetal en riego y sequía en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

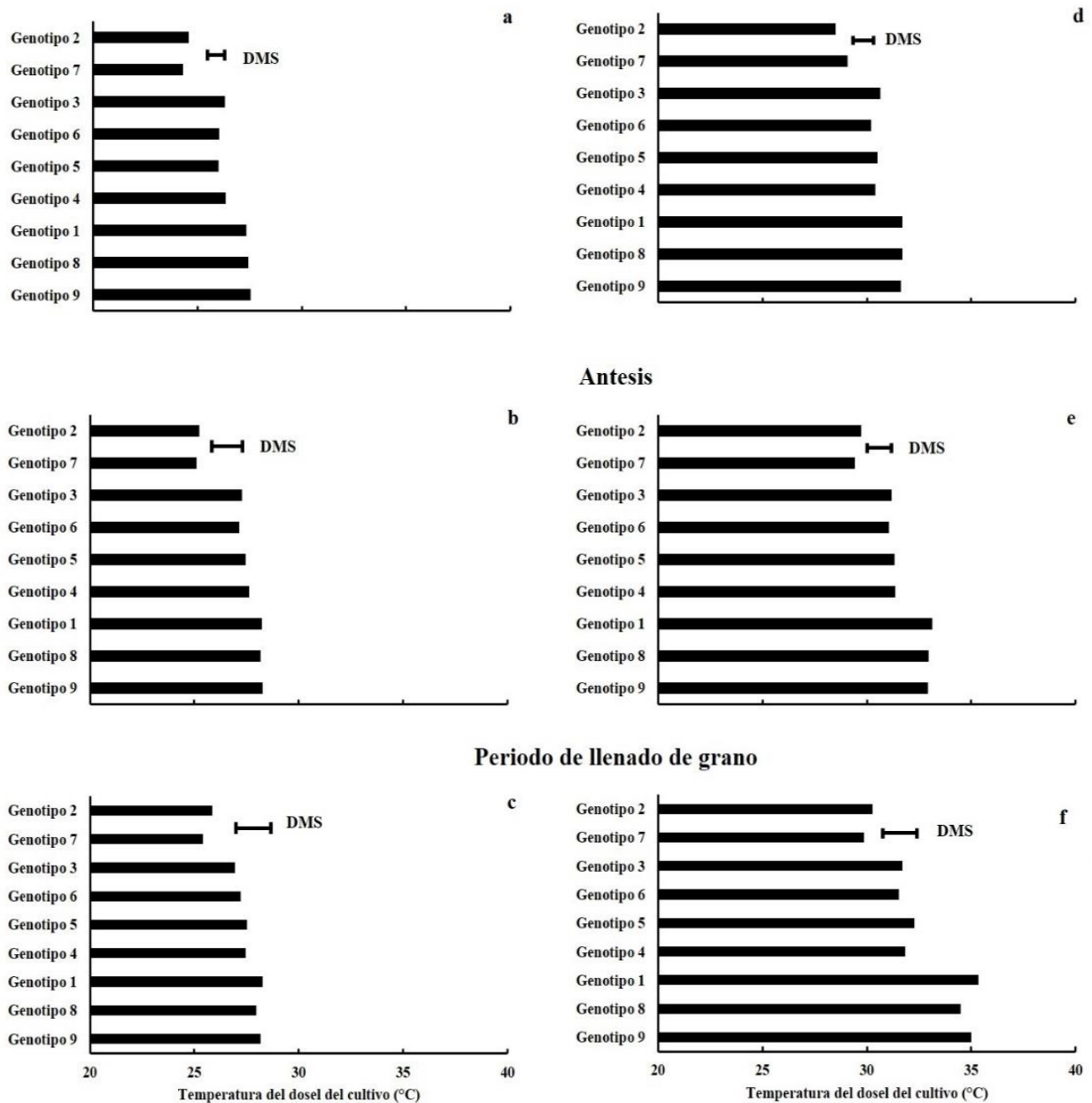
La respuesta diferencial entre la temperatura de las plantas en riego y las plantas en sequía, se debe a que el estrés hídrico provoca reducción en el enfriamiento transpiracional de la hoja a consecuencia del cierre estomático por el bajo potencial hídrico (Blum, *et al.*, 1982; Pinter *et al.*, 1990). En ambientes con baja HR, la temperatura de la planta puede estar algunos grados por debajo de la temperatura ambiente del aire, para acoplarse a la demanda evaporativa y en estas condiciones, el estrés que la planta experimenta por calor será función no únicamente de la temperatura del aire, sino también de factores agronómicos y genéticos que determinan el enfriamiento evaporativo (Reynolds *et al.*, 2010).

#### 4.5.3 Temperatura del dosel vegetal

La Tc en sequía fue mayor que en riego en las diferentes etapas fenológicas del cultivo; la Tc se incrementó conforme avanzó el ciclo del cultivo, siendo más alta durante el periodo de llenado del grano que en las etapas de emergencia de la panícula y antesis, sobre todo en sequía que en riego (Figura 4.4). La Tc está relacionada con el estrés hídrico de la planta de tal forma, que

bajas temperaturas de la planta son indicativo de alto potencial hídrico de la hoja y viceversa, altas temperaturas de la planta se asocian con bajo potencial hídrico de la hoja y alta resistencia estomática; la correlación entre la temperatura del dosel y el potencial hídrico de la hoja fue más alta y significativa con el desarrollo de un mayor grado de estrés hídrico en un grupo de genotipos de trigo en condiciones de sequía, al confirmar que el uso del termómetro infrarrojo puede ser una herramienta útil como método de selección por escape a la deshidratación (Blum *et al.*, 1982). Otro estudio de la temperatura del dosel en genotipos de trigo bajo condiciones de sequía mostró que la temperatura de las plantas bajo estrés hídrico aumentó con el transcurso del tiempo, alcanzando valores de 7 °C durante el periodo de llenado del grano (Blum *et al.*, 1989).

### Emergencia de la panícula



**Figura 4.4** Temperatura del dosel vegetal (°C) en emergencia de la panícula, antesis y periodo del llenado del grano en riego (a, b y c) y sequía (d, e y f) en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos. La barra horizontal representa el valor de la diferencia mínima significativa ( $p \leq 0.05$ ).

Los genotipos 2 y 7 mostraron las  $T_c$  más bajas en las etapas de emergencia de la panícula, antesis y madurez fisiológica en riego (Figura 4.4a) y sequía (Figura 4.4d); también fue notorio que estos genotipos mostraron menor  $T_c$  a pesar del severo estrés hídrico que se desarrolló en la

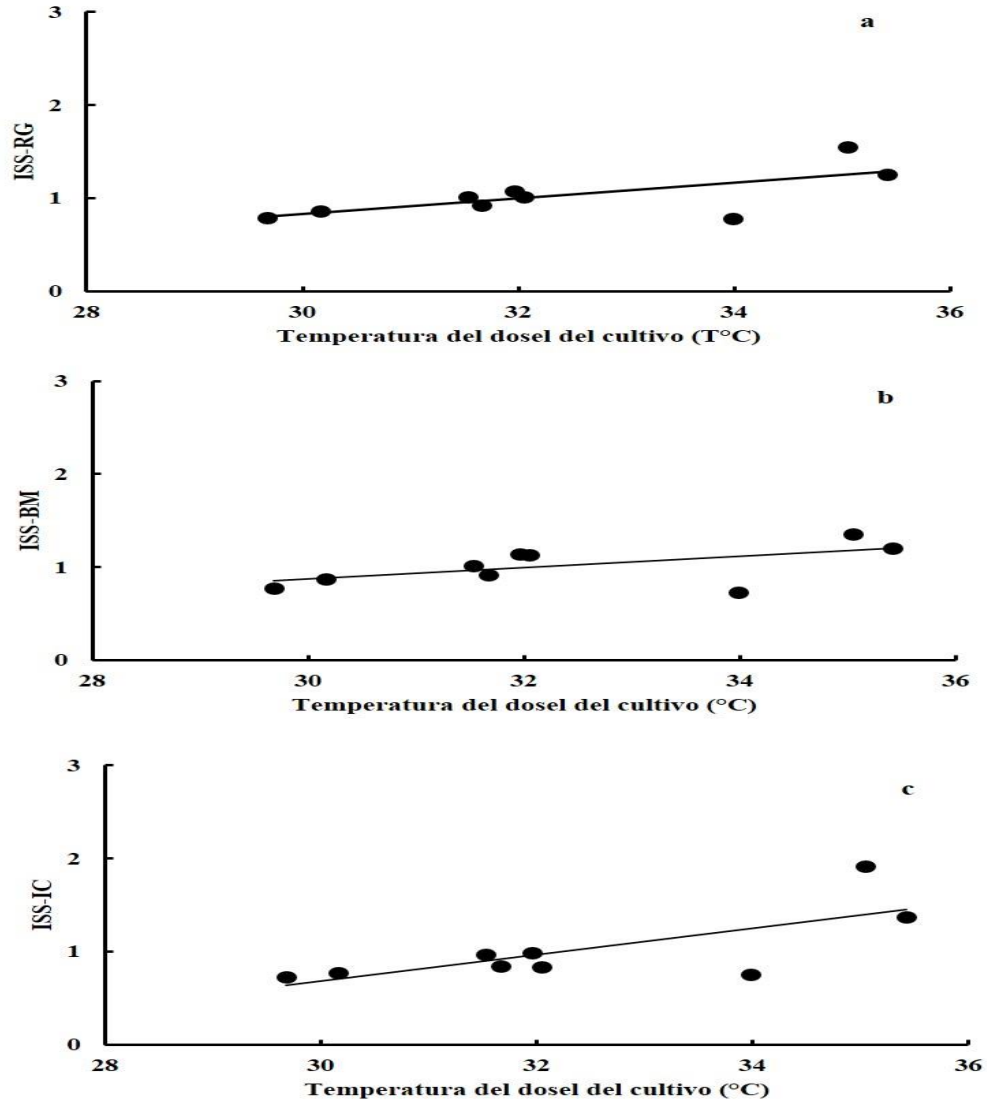
planta, sobre todo en la parte final del periodo de llenado del grano, que coincidió con un periodo de baja precipitación (Figura 4.1) y bajo contenido de humedad en el suelo (Figura 4.2), cabe mencionar que estos dos genotipos mostraron los más altos rendimientos de grano, biomasa aérea, índice de cosecha y granos  $m^{-2}$  en riego y sequía, y que la Línea 2, además de estas características, mostró mayor densidad de raíces que las otras líneas en los estratos de 0 - 70 cm del suelo en riego y sequía, como se mostró en el Capítulo anterior de esta tesis. Pinter *et al.*, (1990) realizaron un estudio realizado con seis genotipos de trigo bajo riego y dos tratamientos de déficit hídrico, mostró que los genotipos con mayor temperatura del dosel bajo condiciones de riego tuvieron menor evapotranspiración y conductancia estomática que aquellos con temperaturas del dosel más bajas; también se determinó que el rendimiento de grano fue similar entre todos los genotipos en riego, pero varió considerablemente bajo condiciones de estrés hídrico y que los genotipos con temperatura alta del dosel en riego, mostraron los más altos rendimientos relativos cuando fueron expuestos a condiciones de déficit hídrico.

Las diferencias entre los resultados obtenidos en el presente estudio y los obtenidos por Pinter *et al.* (1990) en trigo, podrían deberse a diferencias en el tamaño del sistema radical; plantas con un sistema radical más extendido, pueden capturar mayor cantidad de agua del suelo (Farooq *et al.*, 2009; Gowda *et al.*, 2011; Kijoji *et al.*, 2014) y mantener un dosel con menor temperatura aún en condiciones de déficit hídrico en el suelo, particularmente durante las etapas reproductivas del cultivo (Siegfried *et al.*, 2017).

#### **4.5.4 Temperatura del dosel vegetal e índices de estrés**

La temperatura promedio de dosel vegetal determinada desde la etapa previa a la emergencia de la panícula hasta la parte final del periodo de llenado del grano (58-119 dds), se relacionó positiva y significativamente con el índice de susceptibilidad a sequía ( $ISS_{RG}$ ) para rendimiento de grano ( $ISS_{RG} = 0.08(T_c) - 1.7$ ,  $r = 0.70$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.5a); biomasa aérea ( $ISS_{BM} = 0.06(T_c) - 0.95$ ,  $r = 0.58$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.5b) e índice de cosecha ( $ISS_{IC} = 0.14(T_c) - 3.6$ ,  $r = 0.73$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.5c); los genotipos con alta temperatura del dosel vegetal tuvieron mayor índice de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano, biomasa e índice de cosecha; los genotipos 2 y 7 mostraron menor temperatura del dosel vegetal y tuvieron menor índice de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano, biomasa e índice de cosecha.

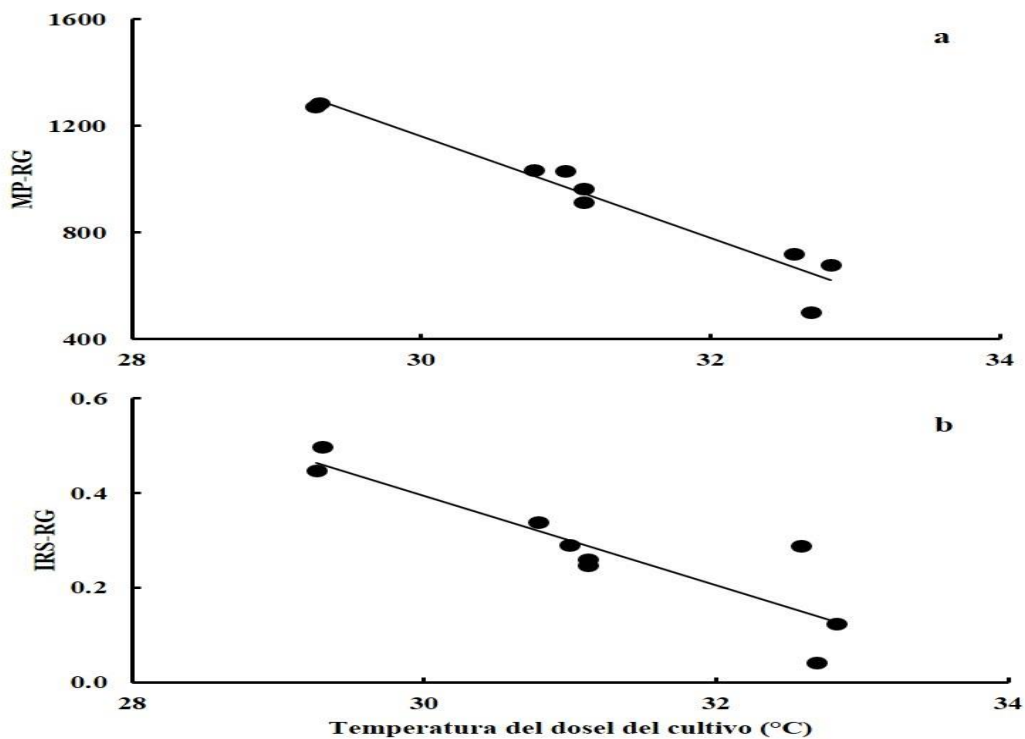
La relación positiva entre  $T_c$  y los índices de susceptibilidad indican que los genotipos susceptibles a sequía sufrieron mayor pérdida de rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha en condiciones de estrés hídrico, tendieron a un mayor grado de estrés y mantuvieron su dosel con mayor temperatura al medio día (Blum *et al.*, 1989). Las temperaturas altas afectan severamente a casi todas las etapas de crecimiento en arroz, pero es la etapa de floración (anthesis y fertilización), particularmente la más susceptible (Farrell *et al.*, 2006); la exposición a temperaturas de 41 °C por 4 h durante la floración causó daños irreversibles y las plantas fueron completamente estériles (IRRI, 1976), mientras que este nivel de temperatura (41 °C) no tiene efecto significativo en la fertilidad de las espiguillas un día antes o después de la floración (Yoshida *et al.*, 1981). El impacto de las temperaturas altas durante la noche es más devastador que las temperaturas altas durante el día o las temperaturas promedio diarias; las etapas de embuche y floración son las más sensitivas es a la temperatura alta, lo cual puede llevar algunas veces a la esterilidad completa de la planta; algunos indicadores fenotípicos como la floración en las horas más frescas del día, mayor viabilidad del polen, anteras más grandes, mayor dehiscencia basal y la presencia de poros basales grandes son algunas de las características fenotípicas que podrían utilizarse, para la selección por tolerancia a calor en arroz (Shah *et al.*, 2011).



**Figura 4.5 Relación entre índices de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano (ISS<sub>RG</sub>), biomasa aérea (ISS<sub>BM</sub>) e índice de cosecha (ISS<sub>IC</sub>) y temperatura promedio del dosel del vegetal en el periodo de llenado del grano, en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

Los índices de productividad media (IPM) y tolerancia a sequía (ITS) se relacionaron negativamente con Tc en promedio de todos los genotipos (Figura 4.6);  $PM = - 191(Tc) + 6887$ ,  $r = - 0.96$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.6a y  $RS = - 0.27(Tc) + 9.4$ ,  $r = -0.93$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.6b (Cuadro 4.7A); los genotipos con mayor Tc mostraron menor índice de productividad media y tolerancia a sequía. Los genotipos 2 y 7 mostraron la más baja Tc y los más altos índices de productividad media y tolerancia a sequía que los otros genotipos (Figuras 4.6a y 4.6b). Al considerar que los

índices IPM y ITS describen la respuesta integrada del genotipo al déficit hídrico en términos de productividad y tolerancia a sequía, se infiere que los genotipos 2 y 7 con mayores índices productividad media y resistencia a sequía y menores temperaturas del dosel, experimentaron menor estrés hídrico y se afectó en menor grado su productividad que los otros genotipos a pesar del déficit hídrico y la alta temperatura (Blum *et al.*, 1989).



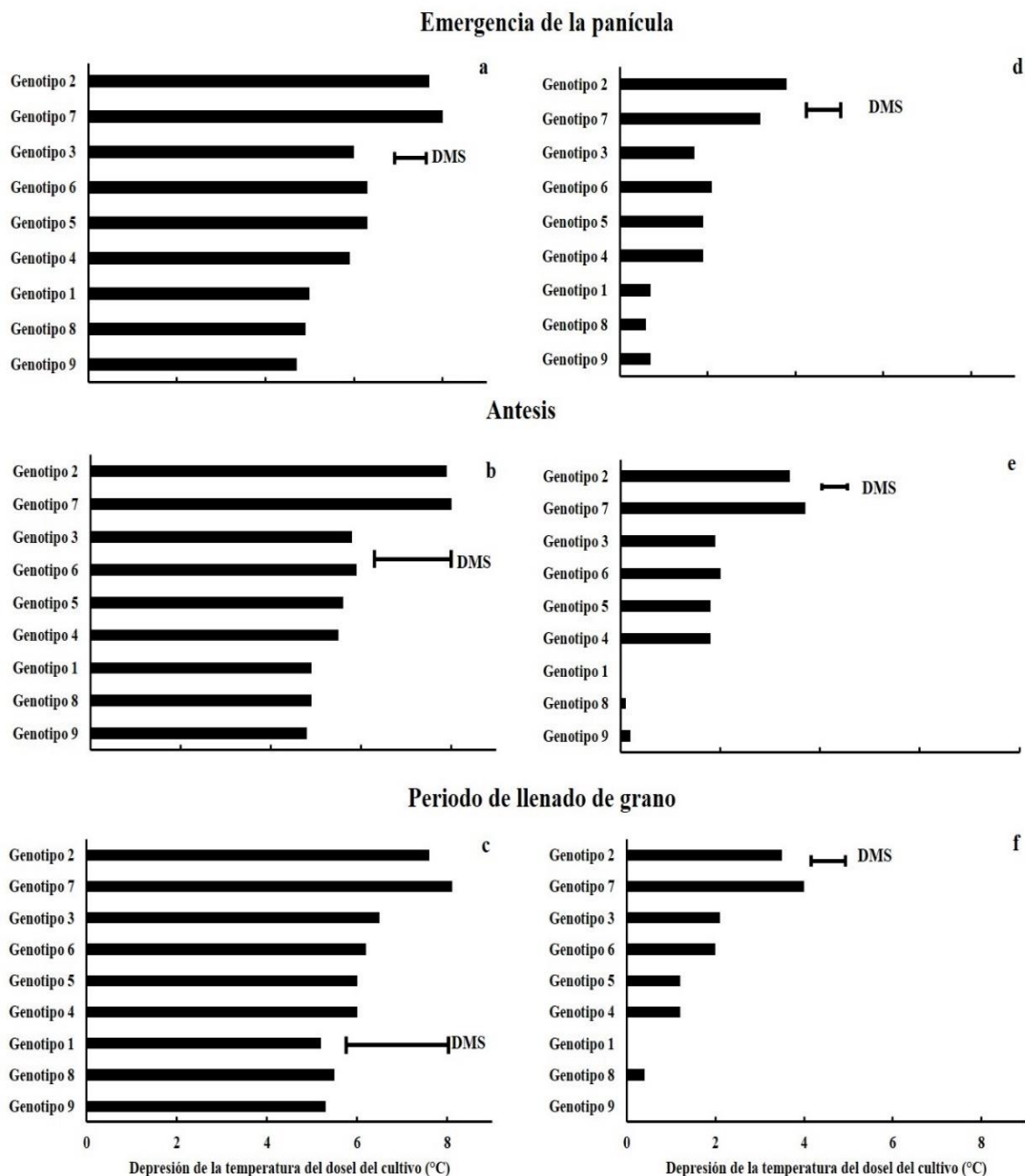
**Figura 4.6. Relación entre la temperatura del dosel vegetal y el índice de productividad media (PM) (a) y el índice de resistencia a sequía (IRS) (b), para rendimiento de grano en promedio de todos los genotipos, en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

#### 4.5.5 Depresión o abatimiento de la temperatura y rendimiento de grano

La depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal (DTc) en riego (6.1 °C) fue mayor que en sequía (1.7 °C) en promedio de los genotipos y las diferentes etapas fenológicas de la planta; DTc disminuyó considerablemente con el transcurso del ciclo biológico de las plantas, alcanzando sus valores más bajos durante el periodo de llenado del grano; la disminución en el abatimiento de la temperatura del dosel fue más acentuada en sequía que en riego (Figura 4.7). Los genotipos 2 y 7 mostraron mayor diferencial de la temperatura que los demás genotipos en las tres



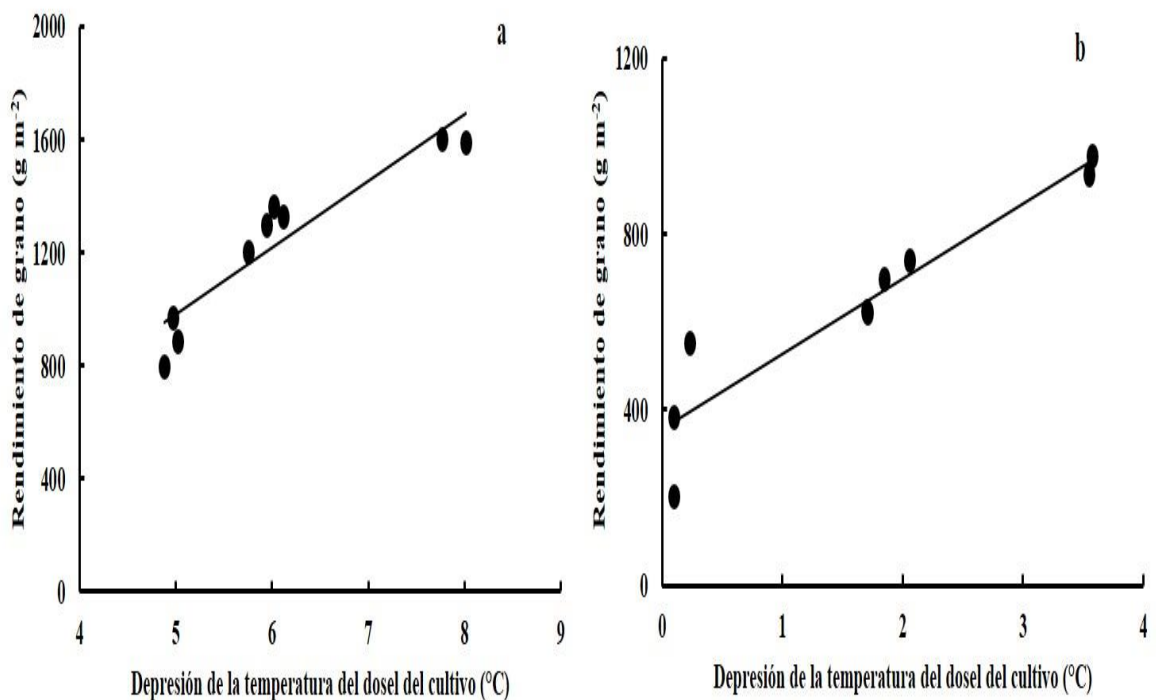
etapas fenológicas estudiadas en riego y sequía; estos genotipos exhibieron mayor DTc que los demás genotipos a pesar del fuerte estrés hídrico que las plantas sufrieron en la parte final del periodo de llenado del grano (Figura 4.7). De acuerdo con Reynolds *et al.*, (1997), la depresión de la temperatura es un criterio eficiente para la evaluación y selección por buen comportamiento de genotipos en ambientes cálidos, al observar que ningún otro carácter fisiológico (por ej., contenido de clorofila en la hoja y conductancia estomática de la hoja ) o morfológico (por ej., biomasa, número de espigas y fecha de floración) correlacionó con el rendimiento, como lo hizo el abatimiento de la temperatura en germoplasma de trigo en ambientes cálidos, concluyeron que el abatimiento de la temperatura medida en condiciones de campo es un buen indicador de alto rendimiento y que esta técnica puede constituir una herramienta fácil, útil y práctica para la selección en ambientes con altas temperaturas (Reynolds *et al.*, 1997; 1998) y sequía en arroz en tierras altas de secano (Hirayama *et al.*, 2006).



**Figura 4.7. Depresión de la temperatura del dosel vegetal (°C) en emergencia de la panícula, antesis y periodo del llenado del grano en riego (a, b y c) y sequía (d, e y f) en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.** La barra horizontal representa el valor de la diferencia mínima significativa ( $p \leq 0.05$ ).

La DTc se relacionó positiva y significativamente con el rendimiento de grano en riego ( $RG = 237(DTc) - 206$ ,  $r = 0.93$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.8a) y sequía ( $RG = 168(DTc) + 365$ ,  $r = 0.93$ ,  $P \leq$

0.01, Figura 4.8b). Los genotipos con mayor DTc tuvieron mayor rendimiento de grano en riego y sequía; los genotipos 2 y 7 mostraron mayor DTc y exhibieron mayor rendimiento de grano que los otros genotipos en riego y sequía. La asociación positiva entre el rendimiento de grano y la DTc se ha observado también en trigo; en una serie de experimentos de campo en Tlaltizapán, Morelos, México, en los ciclos invierno-primavera 1991-92 y 1992-93, se determinó que la DTc medida entre las 12:00 y 16:00 h correlacionó positiva y significativamente con rendimiento de grano ( $r=0.84^{**}$  para 1991-92 y  $r=0.89^{**}$  para 1992-93) y que la etapa de desarrollo del cultivo (pre-emergencia de la espiga, espigamiento, periodo de llenado del grano) no afectó estas correlaciones; también se determinó que la DTc correlacionó positivamente con la conductancia estomática de la hoja bandera, la conductancia medida en el haz de la hoja fue 60 % mayor que la conductancia del envés; también se observó que la conductancia total correlacionó positivamente con días a antesis ( $r=0.80^{**}$ ) y rendimiento de grano ( $r=0.65^{**}$ ) (Amani *et al.*, 1996).



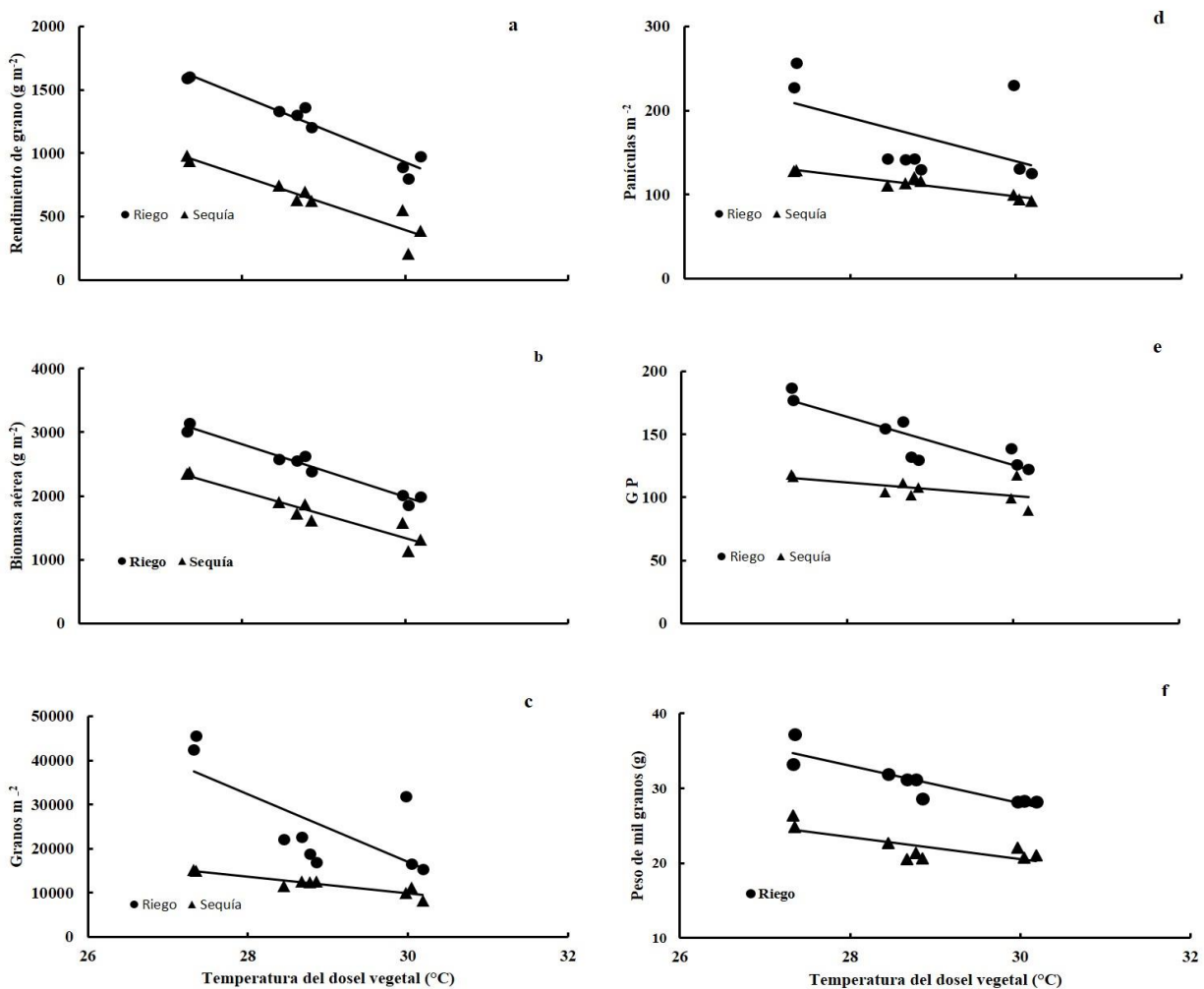
**Figura 4.8. Relación entre la depresión de la temperatura del dosel vegetal y el rendimiento de grano en riego (a) y sequía (b), en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

La estrecha relación entre la depresión de la temperatura del dosel y el rendimiento de grano en riego y sequía es similar a la observada en trigo entre ambientes cálidos y templados (Reynolds *et al.*, 2001); en este trabajo de investigación la depresión de la temperatura mostró alta correlación genética y altos valores de respuesta directa a la selección, indicando que esta característica es heredable y por lo tanto, puede ser útil para la selección en generaciones tempranas (Reynolds *et al.*, 1998). La asociación entre la DTc y el rendimiento de grano permitirá identificar líneas avanzadas tolerantes a calor y descartar aquellas que son claramente inadaptadas en parcelas pequeñas antes de entrar a ensayos de rendimiento repetidos que implican mayores costos, y probablemente también se pueda aplicar a experimentos de selección más controlados (Ayeneh *et al.*, 2002).

#### 4.5.6 Temperatura del dosel vegetal, rendimiento de grano y sus componentes

El rendimiento de grano (RG) y sus componentes biomasa aérea (BM), granos  $m^{-2}$  ( $G M^{-2}$ ), panículas  $m^{-2}$  ( $P M^{-2}$ ), granos por panícula (G P) y peso de mil granos (PMG) se asociaron negativa y significativamente con la Tc en riego y sequía; en riego ( $RG = -262(Tc) + 8774$ ,  $r = -0.97$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9a) y sequía ( $RG = -223(Tc) + 7075$ ,  $r = -0.92$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9a); en riego ( $BM = -413(Tc) + 14365$ ,  $r = -0.98$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9b) y sequía ( $BM = -370(Tc) + 12432$ ,  $r = -0.95$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9b); en riego ( $GM^{-2} = -7643(Tc) + 246273$ ,  $r = -0.742$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9c) y sequía ( $GM^{-2} = -1912(Tc) + 67191$ ,  $r = -0.93$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9c); en riego ( $PM^{-2} = -25.7(Tc) + 912$ ,  $r = -0.38$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.9d) y sequía ( $PM^{-2} = -12(Tc) + 458$ ,  $r = -0.94$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.9d); en riego ( $G P = -19.2(Tc) + 701$ ,  $r = -0.88$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9e) y sequía ( $G P = -5.40(Tc) + 262$ ,  $r = -0.66$ ,  $P \leq 0.05$ , Figura 4.9e); en riego ( $PMG = -2.52(Tc) + 104$ ,  $r = -0.90$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9f) y sequía ( $PMG = -1.48(Tc) + 65.0$ ,  $r = -0.79$ ,  $P \leq 0.01$ , Figura 4.9f). En todos los casos, los genotipos con mayor Tc mostraron menor rendimiento de grano, biomasa aérea, número de granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ , granos por panícula, y peso de mil granos (Figura 4.9). El aumento en la Tc fue más evidente en el rendimiento de grano, granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos que en la biomasa aérea (Figura 4.9); los genotipos más sensitivos a altas temperaturas redujeron el rendimiento y sus componentes en mayor proporción que los genotipos menos sensitivos al calor; los genotipos 2 y 7 mostraron consistentemente menor temperatura del dosel y redujeron en menor proporción su rendimiento de grano, granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos que los demás genotipos en riego y sequía; la respuesta en

biomasa aérea fue similar entre riego y sequía (Figura 4.9). El rendimiento de grano y sus componentes pueden ser severamente afectados por temperaturas altas durante la floración y el periodo de llenado del grano; por ejemplo, en México el rendimiento de grano disminuyó 10 % por cada grado centígrado de incremento en la temperatura nocturna, pero el mismo incremento en la temperatura diurna no tuvo efecto significativo (Lobell *et al.*, 2005). Temperaturas nocturnas > 20 °C, pueden reducir la fertilidad de las espiguillas y consecuentemente disminuir el número y tamaño del grano (Prasad *et al.*, 2008).



**Figura 4.9. Relación entre la temperatura del dosel vegetal (°C) promediada de los 58 a los 119 dds y el rendimiento de grano (a), biomasa aérea (b), granos m<sup>-2</sup> (c), panículas m<sup>-2</sup> (d), granos por panícula (G P) y peso de mil granos (PMG) en riego y sequía, en el ciclo primavera verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

Por otra parte, el rendimiento de grano y sus componentes para cada genotipo expresados en porcentaje con respecto a la media general de riego y sequía, mostró que la mayor variación entre genotipos fue para el rendimiento de grano, biomasa aérea, número de granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ ; la menor variabilidad entre genotipos fue el número de granos por panícula y peso de mil granos (Cuadro 4.1). La alta Tc disminuyó el rendimiento de grano, biomasa aérea, granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos en 25, 33, 25, 13, 9.6 y 7 % por cada 1°C de aumento en la temperatura del dosel vegetal en promedio de todos los genotipos en riego y sequía; los genotipos 2 y 7 mostraron menor reducción en el rendimiento de grano y sus componentes que los demás genotipos por efecto de la temperatura alta en riego y sequía (Cuadro 4.1). Los genotipos 1 y 9 (testigo, “El Silverio”) mostraron mayor reducción del rendimiento de grano, granos  $m^{-2}$  y panículas  $m^{-2}$  que los otros genotipos (Cuadro 4.1).

**Cuadro 4.1. Rendimiento de grano (RG), biomasa área (BM), granos  $m^{-2}$  (G  $M^{-2}$ ), panículas  $m^{-2}$  (P  $M^{-2}$ ), granos por panícula (G P), peso de mil granos (PMG), expresados como porcentaje con respecto a la media general de riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

No. de genotipo	RG	BM	G $M^{-2}$	P $M^{-2}$	G P	PMG
	(%)					
2	136	235	160	137	115	117
7	138	229	152	126	119	109
3	110	191	83	94	91	96
6	111	191	89	90	101	102
5	103	182	93	90	106	96
4	98	170	78	87	93	93
1	73	140	63	77	83	91
8	77	153	110	117	93	93
9 (Testigo)	54	128	73	80	95	91
Media general	934	2112	18928	141	128	27
	g $m^{-2}$	g $m^{-2}$	g $m^{-2}$	p $m^{-2}$	g p	g

## 4.6 CONCLUSIONES

La temperatura del dosel se relacionó estrechamente con la temperatura del aire y en sequía mostró un valor promedio de 0.2 °C mayor que en riego; en sequía la temperatura de las plantas en el periodo de llenado del grano fue mayor que en las etapas de emergencia de la panícula y antesis.

La mayor temperatura del dosel coincidió en el periodo de llenado del grano y con un periodo prolongado de baja precipitación y severa disminución en el contenido de humedad en el suelo.

La temperatura del dosel se relacionó positivamente con el índice de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha, y mostró una relación negativa con los índices de productividad media y resistencia a sequía. Los genotipos que mostraron menor temperatura del dosel, mantuvieron su potencial de rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha y exhibieron mayor productividad y resistencia a sequía.

La depresión de temperatura de dosel en las etapas de emergencia de panícula, antesis y periodo de llenado del grano fue mayor en riego que en sequía, y disminuyó al avanzar las fases fenológicas del cultivo, siendo más baja en el periodo de llenado del grano que en la emergencia de la panícula y antesis en sequía.

La depresión de la temperatura del dosel se relacionó positivamente con el rendimiento de grano.

Por cada grado centígrado de aumento en la temperatura del dosel vegetal se redujo 25, 33, 25, 13, 9.6 y 7 % el rendimiento de grano, biomasa aérea, granos m<sup>-2</sup>, panículas m<sup>-2</sup>, granos por panícula y peso de mil granos en promedio de todos los genotipos en riego y sequía.

Los genotipos 2 y 7 mostraron consistentemente menor temperatura del dosel desde la emergencia de la panícula hasta el periodo de llenado del grano en riego y sequía; la menor temperatura del dosel en estos genotipos se reflejó en menores índices de estrés para rendimiento de grano, biomasa área e índice de cosecha, y mayores índices de productividad y tolerancia a sequia para el rendimiento de grano; estos genotipos exhibieron mayor depresión de la temperatura

del dosel menor reducción en el rendimiento de grano y sus componentes y mayor productividad y resistencia a sequía que los demás genotipos.

#### 4.7 LITERATURA CITADA

- Amani, I., R. A. Fischer and M. P. Reynolds. 1996. Canopy temperature depression association with yield of irrigated spring wheat cultivars in a hot climate. *J. Agron Crop Sci.* 176: 119-129.
- Ashraf, A., A. El-Mohsen, M.A.A. 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 (1): 19-30.
- Ayeneh, A., M. van Ginkel, M. P. Reynolds and K. Ammar. 2002. Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. *Field Crops Res.* 79: 173-184.
- Barrios-Gómez, E. J., C. López-Castañeda y J. Kohashi-Shibata. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agron. Costarric.* 35: 131-145.
- Blum, A., J. Mayer and G. Gozlan. 1982. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.* 5: 137-146.
- Blum, A., L. Shpiler, G. Golan and J. Mayer. 1989. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought stress. *Field Crops Res.* 22: 289-296.
- Brennan, J. P., A. G. Condon, M. Van Ginkel and M. P. Reynolds. 2007. Economic assessment of the use of physiological selection for stomatal aperture-related traits in the CIMMYT wheat breeding programme. *J. Agr. Sci.* 145: 187-194.
- Climate Change Science Program (CCSP). 2009. Thresholds of climate change in ecosystems. A report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. [Fagre DB, Charles CW, Allen CD, Bikerland C, Chapin III FS, Groffman PM, Guntenspergen GR, Knapp AK, McGuire AD, Mulholland PJ, Peters DPC, Robby DD, Sugihara G] US geological survey, Reston Virginia, U.S.A. 156 p.
- Coast, O., R. H. Ellis, A. J. Murdoch, C. Quiñones and K.S.V. Jagadish. 2014. High night temperature induces contrasting responses for spikelet fertility, spikelet tissue temperature, flowering characteristics and grain quality in rice. *Funct. Plant Biol.* 42(2):149-161.



- Farooq, M., A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita and S.M.A. Basra. 2009. Plant drought stress, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* 29: 185-212.
- Farrell, T. C., K. M Fox, R. L. Williams and S. Fukai. 2006. Genotype variation for cold tolerance during reproductive development in rice: screening with cold air and cold water. *Field Crops Res.* 98: 178-194.
- Fischer, A. T. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 897-912.
- 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.
- Guimarães, C. M., L. F. Stone, M. Lorieux, J. P. de Oliveira, G. C. de Oliveira Alencar and R. A. A. Dias. 2010. Infrared thermometry for drought phenotyping of inter and intra specific upland rice lines. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 14 (2): 148-154.
- Hirayama, M., Y. Wada and H. Nemoto. 2006. Estimation of drought tolerance based on leaf temperature in upland rice breeding. *Breed. Sci.* 56: 47-54.
- IRRI. 1976. International Rice Research Institute. Annual Report for 1975. International Rice Research Institute. Manila, The Philippines.
- IRRI. 1983. International Rice Research Institute. Annual Report for 1982. International Rice Research Institute. Manila, The Philippines.
- Jackson, R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato and P. J. Pinter. 1981. Canopy temperature as a crop water indicator. *Water Resour. Res.* 17: 1133-1138.
- 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.
- Kirkegaard, J. A., J. M. Lilley, G. N. Howe and J. M. Graham. 2007. Impact of subsoil water use on wheat yield. *Aust. J. Agr. Res.* 58: 303-315.
- Lafitte, H. R. and B. Curtois. 2002. Interpreting cultivar x environment interactions for yield in upland rice; assigning value to drought-adaptive traits. *Crop Sci.* 42: 1409-1420.

- Lobell, D. B., I. J. Ortíz-Monasterio, G. P. Asner, P. A. Matson, R. L. Naylor and W. P. Falcon. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Res.* 94: 250-256.
- Lopes, M. S., and M. P. Reynolds. 2010. Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. *Funct. Plant Biol.* 37: 147-156.
- Olivares-Villegas, J. J., M. P. Reynolds and G. K. McDonald. 2007. Drought adaptive attributes in the Seri/Babax hexaploidy wheat population. *Funct. Plant Biol.* 34: 189-203.
- Pietragalla, J. Temperatura del dosel. 2013. *In: Pask, A., J. Pietragalla, D. Mullan., P. Chávez-Dulanto., P. N. y M. P Reynolds (Eds.). Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo. México, D.F.: CIMMYT. pp: 10-14.*
- Pinter Jr., P. J., G. Zipoli, R. J. Reginato, R. D. Jackson, S. B. Idso and J. P. Hohman. 1990. Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agric. Water Manag.* 18: 35-48.
- Pinto, R. S., M. P. Reynolds, K. L. Mathews, C. L. McIntyre, J. J. Olivares-Villegas and S. C. Chapman. 2010. Heat and drought adaptive QTL in a wheat population designed to minimize confounding agronomic effects. *Theor. Appl. Genet.* 121: 1001-1021.
- Prasad, P. V. V., S. R. Pisipati, Z. Ristic, U. Bukovnik and A. K. Fritz. 2008. Impact of nighttime temperature on physiology and growth of spring wheat. *Crop Sci.* 28: 2372-2380.
- Reynolds, M. P., S. Nagarajan, M. A. Razzaque and O. A. A. Ageeb (eds.). 1997. Using canopy temperature depression to select for yield potential of wheat in heat-stressed environments. *Wheat Special Report No. 42. Mexico, D.F. CIMMYT.*
- Reynolds, M. P., R. P. Singh, A. Ibrahim, O. A. A. Ageeb, A. Larqué-Saavedra and J. S. Quick. 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica.* 100: 84-95.
- Reynolds, M. P., S. Nagarajan, M. A., M. A. Razzaque and O. A. A. Ageeb. 2001. Heat tolerance: *In: Reynolds, M.P., J.I. Ortiz-Monasterio, and A. McNab (eds.). 2001. Application of physiology in wheat breeding. Mexico, D.F.: CIMMYT. pp: 124-135.*
- Reynolds, M. P., F. Dreccer and R. Trethowan. 2007. Drought adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *J. Exp. Botany.* 58: 177-186.

- Reynolds, M. P., D. Hays and S. Chapman. 2010. Breeding adaptation to heat and drought stress. *In: M.P. Reynolds (eds.), Climate change and crop production.* CAB International, CPI Group (UK) Ltd, Croydon, CR0 4YY. pp. 71-91.
- Rosielle, A. and J. Hamblin. 1981. Theoretical aspect of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Sci.* 21: 943-946.
- SAS. 2009. The SAS System release 9.1 for Windows. Cary, North Carolina, United States: SAS Institute, Inc.
- 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. *Journal of Agricultural Science, Cambridge University Press* 2011. Doi: 10.1017/S0021859611000360.
- Siegfried, J., R. Khosla and L. Longchamps. 2017. Infrared thermometry to quantify in-field soil moisture variability. *Journal of Crop Improvement.* 31: 72-90.
- Takai, T., M. Yano and T. Yamamoto. 2010. Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice. *Field Crops Res.* 115: 165-170.
- Wen-zhong, Z., H. Ya-dong and D. Hong-juan. 2007. Relationship between canopy temperature at flowering stage and soil water content, yield components in rice. *Rice Sci.* 14(1): 67-70.
- Yoshida, S. 1981. *Fundamentals of rice crop science*, Los Baños, The Philippines, IRRI. 269 pp.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES.**

Las deficiencias de humedad en el suelo coincidieron con las etapas de emergencia de la panícula, floración y periodo de llenado del grano, disminuyendo el rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos en 48, 28, 30, 34, 53, 29 y 28 % con respecto a riego. El rendimiento promedio obtenido en riego ( $12.3 t ha^{-1}$ ) y sequía ( $6.4 t ha^{-1}$ ) fue superior al rendimiento de grano promedio nacional de arroz en riego ( $6.4 t ha^{-1}$ ) y temporal o secano ( $3.8 t ha^{-1}$ ), detectando que las Líneas experimentales 2 y 7 produjeron rendimientos de grano, inclusive superiores a los promedios del experimento en riego y sequía y los promedios nacionales en riego y secano, lo cual las hace económicamente viables, para su liberación como variedades comerciales. Estas líneas, también mostraron un comportamiento sobresaliente en la producción de biomasa aérea, índice de cosecha y granos  $m^{-2}$  en riego y sequía; la Línea 2, además de tener altos promedios en estos componentes, mostró alto número de panículas  $m^{-2}$  y peso de mil granos, y la Línea 7 mostró alto número de granos por panícula en riego y secano; adicionalmente, la Línea 2 mostró mayor densidad de raíces en los estratos de 0 a 70 cm en riego y mayor densidad radical en los estratos de 15 a 70 cm en sequía.

Los componentes biomasa aérea final, índice de cosecha, panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , peso de mil granos y granos por panícula mostraron una relación estrecha con el rendimiento en riego y secano; las líneas con mayor rendimiento de grano mostraron alta biomasa aérea, índice de cosecha, panículas  $m^{-2}$ , granos  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos.

Las deficiencia hídricas en el suelo en el tratamiento de sequía durante la floración y llenado del grano se reflejaron en un aumento sustancial en la temperatura del dosel vegetal de las plantas; la temperatura del dosel vegetal en el periodo de llenado del grano fue mayor que en las etapas de emergencia de la panícula y antesis en riego y sequía; en el tratamiento de déficit hídrico la alta temperatura del dosel en el periodo de llenado del grano coincidió con un periodo prolongado de baja precipitación y una severa disminución en el contenido de humedad en el suelo.

La temperatura del dosel se relacionó positivamente con el índice de susceptibilidad a sequía para rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha, y mostró una relación negativa con los índices de productividad media y tolerancia a sequía, de tal forma que los genotipos con menor

temperatura del dosel, disminuyeron en menor grado su rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha y exhibieron mayor productividad y tolerancia a sequía.

La depresión o abatimiento de la temperatura del dosel se relacionó positivamente con el rendimiento de grano; los genotipos con mayor diferencial de temperatura del dosel mostraron mayor rendimiento de grano y sus componentes, y mayor productividad y tolerancia a sequía que los demás genotipos.

Por cada grado centígrado de incremento en la temperatura de dosel se redujo 25, 33, 25, 13, 9.6 y 7 % el rendimiento de grano, biomasa aérea, granos  $m^{-2}$ , panículas  $m^{-2}$ , granos por panícula y peso de mil granos en promedio de todos los genotipos en riego y sequía.

Los genotipos 2 y 7 exhibieron menor temperatura del dosel desde la emergencia de la panícula hasta el periodo de llenado del grano en riego y sequía; la menor temperatura del dosel en estos genotipos se reflejó en menores índices de estrés para rendimiento de grano, biomasa aérea e índice de cosecha, e índice de susceptibilidad a sequía, y mayores índices de productividad y tolerancia a sequía.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis planteada en el presente trabajo, al mostrar que las líneas con mayor rendimiento de grano en riego y sequía, produjeron mayor biomasa en sus órganos aéreos y raíces, y mantuvieron menor temperatura del dosel vegetal y alta depresión o abatimiento de la temperatura del dosel vegetal debido a una mayor densidad de raíces en el estrato de 0-70 cm, mayor resistencia a sequía y estabilidad del rendimiento.

Finalmente, las líneas más productivas podrían utilizarse como progenitores en los programas de mejoramiento y/o como variedades comerciales en sistemas de producción en riego y secano; también, los resultados obtenidos sugieren la posibilidad de explorar con más detalle y en otros ambientes de sequía y calor, el comportamiento agronómico y fisiológico del germoplasma utilizado en el presente estudio.

## CUADROS DEL APÉNDICE CAPÍTULO 3.

**Cuadro 3.1A. Cuadrados medios de rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), panículas m<sup>-2</sup> (P, M<sup>-2</sup>), granos m<sup>-2</sup> (G, M<sup>-2</sup>), peso de 1000 granos (PMG), granos por panícula (G P<sup>-1</sup>), altura de planta (AP, cm), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y densidad radical (DR) en los estratos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70 cm, en riego, sequía, promedio de riego y sequía, y diferencia riego - sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

Fuente de variación	GL	RG (g m <sup>-2</sup> )	BM (g m <sup>-2</sup> )	IC (%)	P M <sup>-2</sup>	G M <sup>-2</sup>	PMG (g)	G P <sup>-1</sup>	AP (cm)	DA	DMF	DR (cm cm <sup>-3</sup> )			
												0-15 cm	15-30 cm	30-50 cm	50-70 cm
Genotipos	8	252037**	609715**	51**	8161**	393375147**	28**	1629**	97ns	10ns	7.8ns	0.002*	0.002*	0.0004ns	0.0006*
Bloques	2	199ns	16981ns	0.23ns	28.7ns	1278086ns	1.7ns	1.9ns	13ns	4.6ns	1.7ns	0.002ns	0.0003ns	0.0002ns	0.0008ns
Error	16	1986	13738	7.1	113	3890290	2.3	29	44	9.3	6.9	0.0009	0.0006	0.0002	0.0002
Máximo		1638	3241	54	281	50299	35	195	127	120	126	0.32	0.22	0.14	0.11
Mínimo		755	1806	42	117	14400	26	120	86	101	116	0.19	0.13	0.07	0.03
<b>Media</b>		<b>1229</b>	<b>2461</b>	<b>50</b>	<b>170</b>	<b>25811</b>	<b>31</b>	<b>148</b>	<b>103</b>	<b>90</b>	<b>121</b>	<b>0.26</b>	<b>0.16</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>
CV (%)		3.6	5.0	5.4	6.2	7.6	4.8	3.6	6.5	3.4	2.2	11.0	14	15.2	27.5
<b>Sequía</b>															
Genotipos	8	181148**	523529**	161**	556**	14611752**	16**	277.9**	108**	9.7ns	6.9ns	0.03ns	0.004**	0.0006**	0.0013**
Bloques	2	6395ns	24332ns	13.6ns	12.1ns	1599780ns	6.9ns	59ns	21ns	4.9ns	0.5ns	0.019ns	0.005ns	0.0006ns	0.0017*
Error	16	2926	7758	7.5	38	1531537	1.9	73	19	20	15	0.011	0.0007*	0.0001	0.0003
Máximo		1080	2472	45	135	17280	29	128	89	95	149	0.9	0.37	0.23	0.14
Mínimo		172	1096	16	85	7480	19	84	65	84	129	0.3	0.21	0.16	0.04
<b>Media</b>		<b>638</b>	<b>1762</b>	<b>35</b>	<b>112</b>	<b>12044</b>	<b>22</b>	<b>107</b>	<b>80</b>	<b>106</b>	<b>138</b>	<b>0.5</b>	<b>0.26</b>	<b>0.18</b>	<b>0.10</b>
CV (%)		8.5	5.0	7.8	5.5	10.3	6.2	7.9	5.4	4.3	2.8	23	10	6.6	18.1
<b>Promedio de riego y sequía</b>															
Humedades	1	4698170**	6605903**	2733**	45763**	2558769039**	979**	21840**	6959**	3456**	2759**	0.5**	0.098**	0.094**	0.03**
Bloques	4	3297ns	20657ns	6.9ns	20ns	1438933ns	4.3ns	30.4ns	17ns	4.8ns	1.1ns	0.01ns	0.003ns	0.0009ns	0.0009ns
Genotipos	8	417529**	1112936**	184**	5409**	256314797**	38**	1364*	62ns	9.2ns	7.1ns	0.012ns	0.004**	0.0002ns	0.0012**
Interacción humedades * genotipos	8	15658**	20307ns	27**	3308**	151672102**	4.9*	544**	144**	10.9ns	7.6ns	0.015*	0.002**	0.0007**	0.0004ns
Error	32	2456	10748	7.3	75	2710913	2.0	50.6	31	14.9	11	0.006	0.0006	0.0002	0.0003
Máximo		1638	3241	54	281	50299	39	195	127	120	149	0.9	0.37	0.16	0.14
Mínimo		172	1096	16	85	7480	19	84	65	84	116	0.3	0.13	0.007	0.03
<b>Media</b>		<b>934</b>	<b>2112</b>	<b>43</b>	<b>141</b>	<b>18928</b>	<b>27</b>	<b>128</b>	<b>92</b>	<b>98</b>	<b>130</b>	<b>0.4</b>	<b>0.21</b>	<b>0.14</b>	<b>0.08</b>
CV (%)		5.3	5%	6.4	6.2	8.7	5.4	5.6	6.1	3.9	2.6	21	11.6	9.7	21.5
<b>Diferencia Riego – Sequía</b>															
Genotipos	8	31335*	40624ns	51.6*	6616**	3033442**	10ns	1090**	287**	22ns	15ns	0.03*	0.004**	0.001*	0.0008*
Bloques	2	6930ns	16253ns	12ns	17ns	60179ns	18ns	83ns	3.4ns	10ns	0.9ns	0.03ns	0.004*	0.0006ns	0.002*
Error	16	6133	11742	8.3	85	3812971	4.2	96	69	18	15	0.01	0.0001	0.0005	0.0002
CV (%)		13	15	20	16	14	24	24	37	27	27	56	37	26	32
Máximo		722	965	26	146	33019	15	81	45	27	20	0.009	0.027	0.036	0.0023
Mínimo		208	243	6	5	2950	5	2	2	10	7	0.06	0.19	0.15	0.098
<b>Media</b>		<b>590</b>	<b>699</b>	<b>14</b>	<b>58</b>	<b>13767</b>	<b>9</b>	<b>40</b>	<b>23</b>	<b>-16</b>	<b>-14</b>	<b>-0.19</b>	<b>-0.09</b>	<b>-0.08</b>	<b>-0.05</b>

\*(P<0.05); \*\*\*(P<0.01); NS = No significativo; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación.

## CAPÍTULO 4.

**Cuadro 4.1A. Cuadrados medios de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego, sequía y promedio riego-sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

Fuente de Variación	GL	Temperatura del dosel vegetal (°C)																				
		58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
<b>Riego</b>																						
Genotipos	8	3.7**	15.6**	3.3**	4.5**	3.9**	3.3**	5.3**	9.2**	14.9**	6.5**	4.4**	3.8**	6.1**	2.8**	10.2**	12.0**	2.8**	2.0**	2.8**	2.7**	2.8**
Bloques	2	0.08ns	0.3ns	0.2ns	1.6ns	0.12ns	0.3ns	0.14ns	0.2ns	1.5ns	0.2ns	0.7ns	0.3ns	0.13ns	0.02ns	0.7ns	0.07ns	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Error	16	0.07	0.2	0.2	4.8	0.04	0.2	0.07	0.2	0.5	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Máximo		27.6	27.8	28.9	29.1	27.5	27.7	27.5	29.9	29.9	29.1	27.7	28.9	29.8	29.9	29	28.7	29.9	29.9	29.9	27.7	28.9
Mínimo		24	23	25.0	23.1	24	24	23	24	22	24.5	23.9	24.7	26.2	26.5	22	24.0	26.5	24.7	26.5	23.9	25.0
<b>Media</b>		<b>26.3</b>	<b>25.3</b>	<b>27.4</b>	<b>25.5</b>	<b>26.0</b>	<b>26.2</b>	<b>25.9</b>	<b>27.0</b>	<b>26.5</b>	<b>27.5</b>	<b>26.1</b>	<b>27.2</b>	<b>28.4</b>	<b>28.0</b>	<b>26.0</b>	<b>26.9</b>	<b>28.0</b>	<b>27.2</b>	<b>28.0</b>	<b>26.1</b>	<b>27.4</b>
CV %		0.9	1.6	1.5	8.7	0.8	1.7	0.7	1.5	2.7	1.2	1.7	2.1	1.7	1.4	3.1	1.9	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
<b>Sequía</b>																						
Genotipos	8	3.5**	6.7**	3.86**	5.3**	3.5**	3.3**	5.6**	13.1**	3.2**	3.4**	3.8**	5.2**	19**	5.7**	4.4**	6.8**	18.3**	5.3**	1.5**	3.7**	3.8**
Bloques	2	0.001ns	0.004ns	0.12ns	0.2ns	0.3ns	0.001ns	0.005ns	0.7ns	0.1ns	0.04ns	0.2ns	0.1ns	0.04ns	0.07ns	0.5ns	0.07ns	0.8ns	0.1ns	0.03	0.02	0.2
Error	16	0.1	0.1	0.2	0.14	0.08	0.04	0.04	0.13	0.06	0.03	0.14	0.1	0.05	0.14	0.17	0.05	0.2	0.04	0.14	0.12	0.2
Máximo		31.9	31.7	32.8	31.9	31.8	32.0	31.9	32.8	32.2	33.2	31.9	32.4	35	33.5	32.8	36.0	36.5	34.9	35.6	36	36
Mínimo		28	27.0	29.1	27.1	28.0	28.5	28.4	29.1	29	30	28.1	27.5	30.2	29	27.4	30.0	29.4	27.5	30	29	30
<b>Media</b>		<b>30.4</b>	<b>29.9</b>	<b>31.3</b>	<b>30.1</b>	<b>30.4</b>	<b>30.7</b>	<b>29.8</b>	<b>31.3</b>	<b>31.1</b>	<b>32.0</b>	<b>30.2</b>	<b>30.5</b>	<b>32.4</b>	<b>31.4</b>	<b>30.4</b>	<b>32.7</b>	<b>32.4</b>	<b>31.2</b>	<b>32.5</b>	<b>32.8</b>	<b>32.7</b>
CV %		0.9	1.2	1.3	1.3	0.9	0.6	0.6	1.1	0.8	0.5	1.3	1.1	0.6	1.2	1.4	0.7	1.3	1.1	1.3	1.1	1.2
<b>Análisis combinado</b>																						
Humedades	1	232**	278**	198**	334**	266**	266*	196*	428**	288**	268**	228**	150**	123**	149*	223**	292**	163**	323**	154**	129**	140**
Bloques	4	0.04ns	0.13ns	0.2ns	0.9ns	0.2ns	0.16ns	0.07ns	0.5ns	0.8ns	0.14ns	0.5ns	0.2*	0.08ns	0.04ns	0.6ns	0.07ns	0.04ns	0.04ns	0.03ns	0.02ns	0.07ns
Genotipos	8	7.0**	12**	6.6**	6.8**	7.2**	6.3**	9.5**	21**	15.7**	9.5**	7.8**	18.6**	22.5**	2.8**	12.4**	17.8*	11.6**	7.4**	1.3**	1.5**	3.3**
<b>Interacción humedades*</b>																						
genotipos	8	0.2**	0.3ns	0.6**	3.0**	0.3**	0.3**	1.4**	1.1**	2.4**	0.4**	0.3**	0.4ns	2.8**	5.7**	2.3**	1.1**	9.5**	14.1**	2.9**	6.2**	6.7**
Error	32	0.06	0.09	0.16	2.5	0.05	0.1	0.05	0.2	0.3	0.06	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2	0.09	0.2	0.14	0.2
Máximo		31.9	31.7	32.8	31.9	31.8	32.0	31.9	32.8	32.2	33.2	31.9	32.4	35	33.5	32.8	36.0	36.5	34.9	35.6	36	36
Mínimo		24	23	25.0	23.1	24	24	23	24	22	24.5	23.9	24.7	26.2	26.5	22	24.0	26.5	24.7	26.5	23.9	25.0
<b>Media</b>		<b>28.4</b>	<b>27.6</b>	<b>29.4</b>	<b>27.8</b>	<b>28.2</b>	<b>28.5</b>	<b>27.9</b>	<b>29.2</b>	<b>28.8</b>	<b>29.8</b>	<b>28.2</b>	<b>28.9</b>	<b>30.4</b>	<b>29.7</b>	<b>28.2</b>	<b>29.8</b>	<b>30.2</b>	<b>29.2</b>	<b>30.3</b>	<b>29.5</b>	<b>30.0</b>
CV%		0.91	1.4	1.4	5.7	0.8	1.2	0.9	1.3	1.8	0.8	1.5	1.6	1.1	1.3	2.3	1.4	1.4	1.0	1.3	1.2	1.5

\*= (p<0.05); \*\*= (p<0.01); n.s.= no significativo GL= Grados de libertad; C.V.= Coeficiente de variación.

**Cuadro 4.2A. Cuadrados medios de la depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

Fuente de Variación	GL	Depresión de la temperatura del dosel vegetal (°C)																				
		58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
<b>Riego</b>																						
Genotipos	8	3.7**	5.6**	3.3**	4.5**	3.9**	3.3**	5.3**	9.2**	14.9**	6.5**	4.4**	3.8**	6.1**	2.8**	10.2**	12.0**	2.8**	2.0**	2.8**	2.7**	2.8**
Bloques	2	0.08ns	0.3ns	0.2ns	1.6ns	0.12ns	0.3ns	0.14ns	0.2ns	1.5ns	0.2ns	0.7ns	0.3ns	0.13ns	0.02ns	0.7ns	0.07ns	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Error	16	0.06	0.16	0.16	4.8	0.04	0.2	0.07	0.18	0.5	0.1	0.19	0.4	0.2	0.15	0.7	0.2	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Máximo		8.1	9.0	7.4	7.9	7.9	8.5	9.0	10.5	10.4	9.0	8.1	7.8	9.3	7.1	9.7	8.0	8.2	10.3	7.0	8.9	7.6
Mínimo		4.5	4.2	3.5	1.9	4.4	4.8	4.5	4.6	2.5	4.4	4.3	3.6	5.7	3.7	2.7	3.3	4.8	5.8	3.6	5.1	3.7
<b>Media</b>		<b>5.8</b>	<b>6.7</b>	<b>4.9</b>	<b>5.6</b>	<b>6.0</b>	<b>6.3</b>	<b>6.1</b>	<b>7.5</b>	<b>5.9</b>	<b>6.0</b>	<b>5.9</b>	<b>5.3</b>	<b>7.1</b>	<b>5.6</b>	<b>5.7</b>	<b>5.1</b>	<b>6.7</b>	<b>7.7</b>	<b>5.5</b>	<b>6.7</b>	<b>5.1</b>
CV %		4.4	6.3	8.1	36.9	3.5	7.1	4.6	5.7	11.9	5.4	7.4	10.9	3.7	6.9	14.0	7.2	5.8	5.6	7.1	8.1	8.5
<b>Seqüía</b>																						
Genotipos	8	3.5**	6.7**	3.82**	5.3**	3.5**	3.3**	5.6**	13.1**	3.2**	3.4**	3.8**	5.2**	19**	5.7**	4.4**	6.8**	18.3**	18.8**	1.5**	4.9**	7.2**
Bloques	2	0.001ns	0.005ns	0.12ns	0.2ns	0.3ns	0.001ns	0.005ns	0.7ns	0.11ns	0.04ns	0.2ns	0.1ns	0.04ns	0.07ns	0.5ns	0.07ns	0.8ns	0.06ns	0.03	0.02	0.13
Error	16	0.07	0.12	0.15	0.14	0.08	0.04	0.04	0.13	0.06	0.03	0.14	0.1	0.05	0.14	0.17	0.05	0.2	0.04	0.14	0.12	0.3
Máximo		4.1	5.0	3.3	4.0	3.9	4.0	3.6	5.4	3.4	3.5	3.9	5.0	5.3	4.6	4.3	2.0	5.3	7.5	3.5	3.8	2.6
Mínimo		0.2	0.3	-0.4	-0.8	0.1	0.5	0.1	1.7	0.2	0.3	0.1	0.1	0.5	0.1	-1.1	-4.0	-1.8	0.1	-2.1	-3.2	-3.4
<b>Media</b>		<b>1.7</b>	<b>2.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>3.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.0</b>	<b>3.1</b>	<b>2.2</b>	<b>1.3</b>	<b>-0.7</b>	<b>2.3</b>	<b>3.8</b>	<b>1.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-0.1</b>
CV %		15.8	16.3	36.6	38.9	17.8	10.3	8.9	19.7	19.1	11.2	21.2	17.0	7.2	17.1	25.7	10.1	13.4	9.2	18.5	20.7	38.6
<b>Análisis combinado</b>																						
Humedades	1	232**	278**	202**	336**	263**	266*	196*	428**	288**	268**	228**	150**	123**	149*	225**	294**	165**	323**	154**	129**	140**
Bloques	4	0.04ns	0.13ns	0.2ns	0.9ns	0.2ns	0.16ns	0.07ns	0.5ns	0.8ns	0.14ns	0.5ns	0.2*	0.08ns	0.04ns	0.6ns	0.07ns	0.04ns	0.04ns	0.03ns	0.02ns	0.07ns
Genotipos	8	7.0**	12**	6.6**	6.8**	7.2**	6.3**	9.5**	21**	15.7**	9.5**	7.8**	18.6**	22.5**	2.8**	12.4**	17.8*	11.6**	7.4**	1.3**	1.5**	3.3**
<b>Interacción humedades*</b>																						
genotipos	8	0.2**	0.3ns	0.6**	3.0ns	0.3**	0.3**	1.4**	1.1**	2.4**	0.4**	0.3**	0.4ns	2.8**	5.7**	2.3**	1.1**	9.5**	14.1**	2.9**	6.2**	6.7**
Error	32	0.06	0.14	0.16	2.5	0.05	0.11	0.05	0.15	0.3	0.06	0.16	0.2	0.1	0.15	0.4	0.15	0.16	0.09	0.15	0.14	0.2
Máximo		8.1	9.0	7.4	7.9	7.9	8.5	9.0	10.5	10.4	9.0	8.1	7.8	9.3	7.1	9.7	8.0	8.2	10.3	7.0	8.9	7.6
Mínimo		0.2	0.3	-0.4	-0.8	0.1	0.5	0.1	1.7	0.2	0.3	0.1	0.1	0.5	0.1	-1.1	-4.0	-1.8	0.1	-2.1	-3.2	-3.4
<b>Media</b>		<b>3.8</b>	<b>4.4</b>	<b>3.0</b>	<b>3.3</b>	<b>3.7</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>5.3</b>	<b>3.6</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.6</b>	<b>5.1</b>	<b>3.9</b>	<b>3.5</b>	<b>2.2</b>	<b>4.5</b>	<b>5.8</b>	<b>3.3</b>	<b>3.3</b>	<b>2.5</b>
CV%		6.9	8.5	13.1	45.6	6.4	8.4	5.9	8.5	14.6	6.9	10.6	13.1	4.7	9.9	17.5	8.5	8.2	6.8	10.2	11.4	15.4

\*= (p<0.05); \*\* = (p<0.01); n.s.= no significativo GL= Grados de libertad; C.V= Coeficiente de variación.



**Cuadro 4.3A. Promedios de temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de Genotipo	Temperatura del dosel vegetal (°C)																				
	58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
2	24.4	23.2	26.6	24.3	24.3	25.1	23.7	25.1	22.7	25.5	24.2	26.1	27.2	26.6	23.0	25.1	26.6	26.1	26.6	24.2	26.6
7	24.7	23.9	25.3	23.5	24.2	24.1	24.7	24.0	22.8	25.0	24.1	25.2	27.2	27.2	22.8	24.5	27.2	25.2	27.2	24.1	25.3
3	26.1	25.7	27.3	25.4	26.3	26.2	26.4	27.1	27.5	28.3	26.2	27.2	28.2	27.2	27.3	26.6	27.2	27.2	27.2	26.2	27.3
6	26.1	25.3	27.5	25.4	25.6	26.4	25.1	26.9	26.0	26.6	26.4	26.5	28.2	28.5	27.4	26.2	28.5	26.5	28.5	26.4	27.5
5	26.6	25.0	27.4	25.3	25.5	26.2	25.1	27.0	26.7	27.7	26.2	27.4	28.3	29.0	25.6	27.2	29.0	27.4	29.0	26.2	27.4
4	26.7	24.6	27.4	26.4	26.4	26.4	26.5	26.6	28.0	28.2	26.4	27.4	27.8	28.6	26.3	27.2	28.6	27.4	28.6	26.4	27.4
1	27.4	26.2	28.6	26.6	27.2	27.3	27.3	28.2	28.1	29.0	27.3	28.2	29.5	28.3	27.0	28.2	28.3	28.9	28.3	27.3	28.6
8	27.3	26.9	28.3	26.1	27.0	27.2	27.3	29.5	27.9	28.7	27.2	28.3	29.3	28.1	27.4	28.5	28.1	28.3	28.1	27.2	28.3
9	27.4	27.3	28.6	26.5	27.2	27.2	27.4	29.0	28.4	28.7	27.1	28.6	29.5	28.3	27.1	28.5	28.3	28.6	28.3	27.1	28.6
<b>Media</b>	<b>26.3</b>	<b>25.3</b>	<b>27.4</b>	<b>25.5</b>	<b>26.0</b>	<b>26.2</b>	<b>25.9</b>	<b>27.0</b>	<b>26.5</b>	<b>27.5</b>	<b>26.1</b>	<b>27.2</b>	<b>28.4</b>	<b>28.0</b>	<b>26.0</b>	<b>26.9</b>	<b>28.0</b>	<b>27.2</b>	<b>28.0</b>	<b>26.1</b>	<b>27.4</b>
DMS (P≤0.05)	0.4	0.7	0.7	1.5	0.4	0.8	0.5	0.7	1.2	0.6	0.8	1.0	0.9	1.4	1.4	0.5	1.4	1.0	1.4	0.8	0.7

**Cuadro 4.4A. Promedios de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de Genotipo	Temperatura del dosel vegetal (°C)																				
	58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
2	28.2	27.2	29.4	27.6	28.3	28.6	29.2	29.4	29.6	30.3	28.6	29.1	29.4	29.4	29.1	30.5	30.3	29.1	30.3	30.1	30.5
7	29.6	28.3	29.6	28.6	29.2	29.3	28.5	29.6	29.4	30.6	28.6	27.9	29.5	29.5	28.2	30.3	29.9	27.9	30.5	29.1	30.3
3	30.5	30	32.2	30.4	30.4	30.5	28.9	32.2	31.3	32.0	30.4	31.2	31.1	30.3	30.7	32.0	31.6	31.2	31.9	30.4	32.0
6	30.5	29.5	30.8	29.4	30.6	31.1	28.7	30.8	30.4	31.3	29.4	30.2	32.4	31.5	30.3	31.5	32.4	30.2	32.2	32.0	31.6
5	30.2	30.2	31.3	30.2	30.4	30.9	29.1	31.3	31.5	32.0	30.2	30.3	33.5	31.2	30.4	32.3	30.5	30.3	32.3	34.0	32.3
4	30.5	29.4	31.6	30.6	30.3	30.8	28.6	31.6	31.4	32.5	30.6	31.3	33.7	31.6	28.3	31.4	31.3	31.3	32.2	34.0	31.4
1	31.7	31.3	32.4	31.3	31.5	31.1	31.5	32.4	32.0	33.0	31.3	31.8	36.0	33.2	32.3	35.5	36.2	34.5	35.4	35.5	35.5
8	31.6	31.6	32.3	31.3	31.2	31.8	31.5	32.3	32.0	33.1	31.3	31.6	34.8	32.6	32.4	35.2	33.4	31.6	33.5	35.0	35.2
9	31.3	31.5	31.9	31.5	31.7	31.6	31.6	31.9	32.1	33.0	31.5	31.4	36.0	32.7	32.1	35.3	36.1	34.4	33.8	35.2	35.3
<b>Media</b>	<b>30.4</b>	<b>29.9</b>	<b>31.3</b>	<b>30.1</b>	<b>30.4</b>	<b>30.7</b>	<b>29.8</b>	<b>31.3</b>	<b>31.1</b>	<b>32.0</b>	<b>30.2</b>	<b>30.5</b>	<b>32.4</b>	<b>31.4</b>	<b>30.4</b>	<b>32.7</b>	<b>32.4</b>	<b>31.2</b>	<b>32.5</b>	<b>32.8</b>	<b>32.7</b>
DMS (P≤0.05)	0.5	0.6	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.7	0.4	0.3	0.7	0.6	0.2	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.8	0.3	0.6

**Cuadro 4.5A. Medias de depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en riego. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de Genotipo	Depresión de la temperatura del dosel vegetal (°C)																				
	58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
2	7.8	8.8	5.8	6.8	7.6	7.4	8.3	9.4	9.7	8.0	7.8	6.4	8.3	7.0	8.7	6.9	8.1	8.9	6.9	8.6	6.0
7	7.4	8.1	7.1	7.6	7.7	8.4	7.3	10.5	9.6	8.5	7.9	7.3	8.3	6.4	8.9	7.5	7.5	9.8	6.3	8.7	7.3
3	6.0	6.3	5.1	5.7	5.7	6.3	5.6	7.4	4.9	5.2	5.8	5.3	7.3	6.4	4.4	5.4	7.5	7.8	6.3	6.6	5.3
6	6.0	6.7	4.9	5.7	6.3	6.1	6.9	7.6	6.4	6.9	5.6	6.0	7.3	5.1	4.3	5.8	6.2	8.5	5.0	6.4	5.1
5	5.5	7.0	4.9	5.8	6.4	6.3	6.9	7.5	5.7	5.8	5.8	5.1	7.2	4.6	6.1	4.8	5.7	7.6	4.5	6.6	5.2
4	5.4	7.4	4.9	4.7	5.6	6.1	5.5	7.9	4.4	5.3	5.6	5.1	7.7	5.0	5.4	4.8	6.1	7.6	4.9	6.4	5.2
1	4.8	5.8	3.8	4.5	4.7	5.2	4.7	6.3	4.3	4.5	4.7	4.3	6.0	5.3	4.6	3.8	6.4	6.1	5.2	5.5	4.0
8	4.8	5.1	4.1	5.0	4.9	5.3	4.7	5.0	4.5	4.8	4.8	4.2	6.2	5.5	4.3	3.5	6.6	6.7	5.4	5.6	4.3
9	4.8	4.7	3.7	4.6	4.8	5.3	4.6	5.5	4.0	4.8	4.9	3.9	6.0	5.3	4.6	3.5	6.4	6.4	5.2	5.7	4.0
<b>Media</b>	<b>5.8</b>	<b>6.7</b>	<b>4.9</b>	<b>5.6</b>	<b>6.0</b>	<b>6.3</b>	<b>6.1</b>	<b>7.5</b>	<b>5.9</b>	<b>6.0</b>	<b>5.9</b>	<b>5.3</b>	<b>7.1</b>	<b>5.6</b>	<b>5.7</b>	<b>5.1</b>	<b>6.7</b>	<b>7.7</b>	<b>5.5</b>	<b>6.7</b>	<b>5.1</b>
DMS (P≤0.05)	0.44	0.69	0.69	1.47	0.36	0.78	0.49	0.74	1.22	0.56	0.76	1.0	0.9	1.36	1.39	0.48	1.37	1.0	1.37	0.76	0.69

**Cuadro 4.6A. Medias de depresión de la temperatura del dosel vegetal (Tc, °C) entre los 58 a 119 días después de la siembra en sequía. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos, México.**

No. de Genotipo	Depresión de la temperatura del dosel vegetal (°C)																				
	58	62	66	68	72	74	76	79	81	83	86	88	90	95	97	100	109	111	114	117	119
2	3.9	4.8	3.0	3.5	3.6	3.8	2.8	5.1	2.8	3.2	3.4	3.4	4.9	4.2	2.6	1.5	4.3	5.9	3.2	2.7	2.1
7	2.6	3.7	2.8	2.5	2.7	3.2	3.5	4.9	3.0	2.9	3.4	4.6	5.1	4.1	3.5	1.7	4.8	7.1	3.0	3.7	2.3
3	1.7	2.0	0.1	0.7	1.5	2.0	3.1	2.3	1.1	1.5	1.6	1.3	4.4	3.3	1.0	0.0	3.0	3.8	1.6	2.4	0.6
6	1.6	2.5	1.5	1.7	1.4	1.4	3.3	3.7	2.0	2.2	2.6	2.3	3.1	2.1	1.4	0.4	2.3	4.8	1.3	0.8	1.0
5	2.0	1.8	1.1	0.9	1.5	1.5	2.8	3.2	0.9	1.5	1.8	2.2	2.0	2.4	1.3	0.0	4.2	4.7	1.2	0.0	0.3
4	1.6	2.6	0.8	0.5	1.6	1.7	3.3	2.9	1.0	1.0	1.4	1.2	1.8	2.0	3.4	0.6	3.4	3.7	1.3	0.0	1.2
1	0.4	0.7	0.0	-0.2	0.4	1.4	0.5	2.1	0.4	0.5	0.7	0.7	2.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
8	0.5	0.4	0.1	-0.2	0.7	0.7	0.5	2.2	0.4	0.4	0.7	0.8	0.7	0.9	0.0	0.0	1.3	3.3	0.0	0.0	0.0
9	0.9	0.5	0.4	-0.5	0.2	0.9	0.4	2.6	0.3	0.5	0.5	1.1	3.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
<b>Media</b>	<b>1.7</b>	<b>2.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>3.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.0</b>	<b>3.1</b>	<b>2.2</b>	<b>1.3</b>	0.5	2.6	3.8	1.3	1.1	0.8
DMS (P≤0.05)	0.46	0.59	0.7	0.65	0.47	0.33	0.34	0.68	0.44	0.29	0.65	0.57	0.22	0.66	0.8	0.62	0.66	0.59	0.85	0.35	0.62

**Cuadro 4.7A. Rendimiento de grano en riego (RG<sub>R</sub>) y sequía (RG<sub>S</sub>), e índices de susceptibilidad, productividad y tolerancia a la sequía, calculados con el rendimiento de grano en riego y sequía, para todos los genotipos. Ciclo primavera-verano 2013. Zacatepec, Morelos.**

No de genotipo	RG <sub>R</sub>	RG <sub>S</sub>	ISS	MP	IRS
2	1606a	939a	0.86de	1273a	0.45a
7	1590a	980a	0.80e	1285a	0.50a
3	1364b	698cb	1.02cd	1031b	0.29b
6	1330b	743b	0.92cde	1036b	0.34b
5	1300b	627cd	1.07bc	964c	0.25b
4	1207c	621cd	1.01cd	914c	0.26b
1	972d	385e	1.26b	678d	0.12c
8	890e	554d	0.79e	722d	0.29b
9 (Testigo)	800f	203f	1.55a	501e	0.04c
Media general	1229	638	1.03	934	0.28

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ). ISS= Índice de susceptibilidad a sequía; MP= Media de productividad; IRS= índice de resistencia a sequía.