



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

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

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GENÉTICA**

**GANANCIA DEL RENDIMIENTO Y DE SUS COMPONENTES  
BAJO RIEGO NORMAL Y LIMITADO DE LOS TRIGOS  
HARINEROS LIBERADOS EN MÉXICO DE 1940 A 2015**

**PAQUINI RODRÍGUEZ SARA LUCÍA**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

2015

---

**La presente tesis titulada:** Ganancia del rendimiento y de sus componentes bajo riego normal y limitado de los trigos harineros liberados en México de 1940 a 2015, **realizada por la alumna:** Sara Lucía Paquini Rodríguez, **bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:**

MAESTRA EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. IGNACIO BENÍTEZ RIQUELME

ASESOR

DR. ABEL MUÑOZ OROZCO

ASESOR

DR. HÉCTOR EDUARDO VILLASEÑOR MIR

**GANANCIA DEL RENDIMIENTO Y DE SUS COMPONENTES BAJO RIEGO  
NORMAL Y LIMITADO DE LOS TRIGOS HARINEROS LIBERADOS EN MÉXICO DE  
1940 A 2015**

**PAQUINI RODRÍGUEZ SARA LUCÍA M. en C.**

**Colegio de Postgraduados, 2015**

**RESUMEN**

El objetivo de la presente investigación fue probar en dos localidades, dos niveles de riego, y dos fechas de siembra dentro de dos localidades, un grupo de variedades de trigo harinero liberadas en un periodo de 67 años para tener idea de los avances logrados en el mejoramiento de los genotipos y las interacciones de los genotipos con ciertos factores ambientales. La investigación se estableció bajo el diseño experimental en bloques al azar en parcelas subdivididas con cuatro factores: localidad, régimen de humedad edáfica, fecha de siembra y genotipo. El efecto sobre el rendimiento de grano aumentó cuando la siembra fue tardía y se combinó con riego limitado debido a las altas temperaturas ocurridas en el periodo de llenado de grano. Los componentes del rendimiento más afectados significativamente por el nivel del riego fueron biomasa aérea, espigas por metro cuadrado, y granos por metro cuadrado; por fechas de siembra tardía los más afectados fueron peso de mil granos, biomasa aérea, y granos por metro cuadrado en Celaya, y en Montecillo biomasa aérea y espigas por metro cuadrado. La ganancia genética del rendimiento de grano promedio de los cuatro experimentos fue de 1.21 % anual ( $41.77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) que en 67 años y partiendo de las variedades liberadas en el año de 1948 representó un aumento acumulado de  $2.8 \text{ t ha}^{-1}$ . Bajo riego normal, el progreso de 1.10 % fue menor que el de riego limitado (1.35 %) indicando que en el futuro el rendimiento podría mantenerse con menos agua y con el mismo volumen de agua usado actualmente ampliar el área cultivable irrigada. En la segunda fecha de siembra desarrollada en temperaturas más altas mejoró la ganancia genética. Los caracteres de trigo presentan cambios significativos en los genotipos modernos respecto a los antiguos, siendo el contenido de clorofila, peso de mil granos, tasa de llenado de grano, y número de granos por metro cuadrado los que han contribuido al rendimiento de grano de manera continua. 'Borlaug 100 F2014', 'Bacorehuis F2015', y 'Baviacora M92' fueron identificados como genotipos que disminuyeron menos su rendimiento al pasar de una condición de riego normal a limitado, mientras 'Nana F2007' fue la variedad que bajó menos su rendimiento de una fecha de siembra temprana a una tardía en Celaya.

**Palabras clave:** *Triticum aestivum* L., efecto del riego limitado, fechas de siembra, interacción genotipo ambiente, mejoramiento genético.

# YIELD AND ITS COMPONENTS GENETIC GAINS UNDER NORMAL AND LIMITED IRRIGATION OF BREAD WHEAT VARIETIES RELEASED IN MEXICO SINCE 1940 TO 2015

PAQUINI RODRÍGUEZ SARA LUCÍA M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015

## ABSTRACT

The aim of this investigation was to assess a group of bread varieties, released in a period of 67 years, tested under two irrigation levels, two sowing dates in two different locations in order to get an idea of the genetic gains achieved and the interactions between genotypes and certain environmental factors. The experiments were established under a completely randomized block split-split plot design with four factors: irrigation regime, location, sowing date, and genotype. The limited irrigation effect on grain yield increased with the effect of late sowing due to the occurrence of high temperatures during grain filling period. The most affected yield components by water deficit were aerial biomass, spikes per square meter, and grains per square meter; because of sowing late the most affected were thousand kernel weight, aerial biomass, and grains per square meter in Celaya, and aerial biomass and spikes per square meter in Montecillo. The yield genetic gain on the average was 1.21 % annually ( $41.77 \text{ kg ha}^{-1}$ ) which signified an accumulated increase of  $2.8 \text{ t ha}^{-1}$  in 67 years. Under normal irrigation, the rate of progress of 1.10 % was lower than for limited irrigation (1.35 %), indicating that in the future yield could be maintained with less water use, moreover the same actual water volume could permit to widen the cultivated area. Genetic gain was better for the second sowing date (with high temperatures) than for the first one. Traits of modern genotypes changed significantly respect to old ones and the characters that have contributed continuously to grain yield are chlorophyll content, thousand kernel weight, grain filling rate, and number of grains per square meter. 'Borlaug 100 F2014', 'Bacorehuis F2015', and 'Baviacora M92' were the genotypes that diminished their yield the least under limited irrigation while 'Nana F2007' performed the best under heat stress in Celaya.

**Key words:** *Triticum aestivum* L., breeding, genotype environment interaction, limited irrigation effect, sowing dates.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados y al Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Genética por brindarme la oportunidad de formarme como Maestra en Ciencias.

Al Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT, a través del proyecto No. 146788 denominado “Sistema de Mejoramiento Genético para Generar Variedades Resistentes a Royas, de Alto Rendimiento y Alta Calidad para una Producción Sustentable de Trigo en México”, por el financiamiento de la presente investigación.

Al Dr. Ignacio Benítez Riquelme por su invaluable orientación para la planeación, ejecución y término de esta tesis.

Al Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir por sus sugerencias y apoyo para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Abel Muñoz Orozco por compartir sus conocimientos y entusiasmo en el tema de investigación.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta por su paciencia y apoyo para el análisis estadístico de los datos.

Al Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro por facilitarme el equipo y espacio del Laboratorio de Física de Suelos a su cargo.

## DEDICATORIA

A ti Señor Dios porque eres quien me mantiene de pie.

A mis padres Manuel Paquini y Sara Rodríguez por su ejemplo de vida, su apoyo y amor incondicionales.

A mis hermanos: María Teresa Paquini y Manuel Paquini por su apoyo constante y su cariño.

A mis cuñados: Soledad Crespo y Alberto Muñoz, gracias por su respaldo y oraciones.

A mis sobrinos: Manuel, Víctor y Karen, como una muestra de esfuerzo y superación.

A todos mis amigos y compañeros con quienes he compartido momentos alegres y no tan alegres.

# CONTENIDO

## Página

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA .....	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE CUADROS .....	ix
LISTA DE CUADROS-APÉNDICE.....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Mejoramiento genético de trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.) en México .....	4
2.1.1 Situación del mejoramiento de trigo antes de la Revolución Verde .....	4
2.1.2 El proyecto de modernización agrícola.....	5
2.1.3 Colaboración nacional e internacional para el mejoramiento de trigo en México .....	10
2.1.4 Mejoramiento de trigo para las zonas irrigadas del norte .....	12
2.1.5 Mejoramiento genético para El Bajío .....	14
2.1.6 Mejoramiento de trigo para áreas de temporal.....	15
2.1.7 Mejoramiento de trigo en la actualidad .....	21
2.2 Medición del avance genético del trigo.....	22
2.3 Efecto de la sequía en el trigo.....	29
2.4 Mejoramiento genético para resistencia a sequía.....	36
2.5 Justificación del mejoramiento genético para zonas de temporal y riego limitado.....	41
2.5.1 Efecto del cambio climático en la precipitación y en el trigo .....	42
2.5.2 Situación del abastecimiento del agua en las principales zonas trigueras del país.....	46
2.6 Importancia del trigo en México.....	52
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	54
3.1 Diseño de la investigación.....	54
3.2 Localidades.....	54

3.3	Material Genético .....	55
3.4	Análisis de suelo y determinación de las constantes de humedad .....	56
3.5	Manejo experimental.....	57
3.6	Registro de las variables en estudio.....	59
3.7	Análisis estadístico .....	61
3.8	Propiedades químicas y físicas de los suelos de las localidades de prueba .....	64
3.9	Temperatura máxima <i>maximorum</i> , temperatura mínima <i>minimorum</i> , y precipitación durante el desarrollo de los experimentos .....	65
3.10	Contenido hídrico del suelo .....	68
4.	RESULTADOS .....	74
4.1	Análisis de varianza para cada fecha de siembra.....	74
4.2	Análisis de varianza para fechas de siembra de cada localidad.....	80
4.3	Comparación de fechas de siembra.....	81
4.4	Análisis de varianza para localidades.....	83
4.5	Análisis de varianza de los ambientes.....	86
4.6	Análisis de varianza combinado.....	90
4.7	Análisis de componentes principales.....	94
4.8	Ganancia del rendimiento de grano .....	95
4.9	Variables que ayudan a explicar el rendimiento de grano .....	98
4.10	Caracteres fisiotécnicos del trigo a través de las eras .....	100
4.11	Interacción era - genotipo por niveles de riego.....	111
4.12	Interacción era - genotipo por fechas de siembra.....	114
5.	DISCUSIÓN .....	127
5.1	Influencia de la precipitación en el manejo del riego limitado.....	127
5.2.	Efecto del nivel de riego, fecha de siembra, y localidad sobre las variables de estudio .....	130
5.2.1	Rendimiento de grano .....	130
5.2.2	Altura de planta .....	132
5.2.3	Contenido de clorofila.....	133
5.2.4	Temperatura del dosel.....	136
5.2.5	Días a espigamiento y días a madurez .....	136
5.2.6	Longitud de espiga .....	138
5.2.7	Número de espiguillas por espiga.....	140

5.2.8	Peso de mil granos .....	141
5.2.9	Índice de cosecha .....	142
5.2.10	Biomasa aérea.....	143
5.2.11	Número de espigas por metro cuadrado .....	144
5.2.12	Número de granos por metro cuadrado.....	145
5.2.13	Tasa de llenado de grano .....	147
5.2.14	Peso hectolítrico .....	148
5.3	Interacción era - genotipo por niveles de riego.....	150
5.4	Interacción era - genotipo por fechas de siembra.....	151
5.5	Regresión paso a paso .....	153
5.6	Ganancia genética del rendimiento de grano y sus componentes en general y bajo riego normal y limitado .....	154
6.	CONCLUSIONES.....	158
7.	REFERENCIAS.....	160
8.	APÉNDICE .....	189

## LISTA DE CUADROS

### Página

<b>Cuadro 1.</b> Cambios futuros en la temperatura media anual y precipitación total anual en los estados seleccionados.....	45
<b>Cuadro 2.</b> Acuíferos ubicados en las principales zonas trigueras y su disponibilidad de agua.....	49
<b>Cuadro 3.</b> Grado de presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2013) en las regiones hidrológico-administrativas donde se localizan zonas productoras de trigo.....	50
<b>Cuadro 4.</b> Oferta de agua superficial y subterránea, y demanda de agua del sector agropecuario en la actualidad y hacia el 2030 en cada región hidrológico-administrativa (en miles de hectómetros cúbicos). .....	52
<b>Cuadro 5.</b> Fechas de siembra en las dos localidades.....	55
<b>Cuadro 6.</b> Genotipos utilizados en la investigación.....	57
<b>Cuadro 7.</b> Propiedades del suelo y métodos para su análisis.....	58
<b>Cuadro 8.</b> Propiedades químicas del suelo de las dos localidades de prueba Celaya, Gto y Montecillo, Méx.. .....	65
<b>Cuadro 9.</b> Propiedades físicas del suelo de las dos localidades: Celaya, Gto y Montecillo, Méx.....	65
<b>Cuadro 10.</b> Análisis de varianza de los datos de la primera fecha de siembra en Celaya, Gto. .....	75
<b>Cuadro 11.</b> Análisis de varianza de los datos de la segunda fecha de siembra en Celaya, Gto. .....	76
<b>Cuadro 12.</b> Análisis de varianza de los datos de la primera fecha de siembra en Montecillo, Méx.....	77
<b>Cuadro 13.</b> Análisis de varianza de los datos de la segunda fecha de siembra en Montecillo, Méx.. .....	78
<b>Cuadro 14.</b> Comparación de medias de las variables respecto de los dos niveles de riego de cada fecha de siembra de cada localidad. ....	80
<b>Cuadro 15.</b> Análisis de varianza para fechas de siembra en Celaya, Gto. ....	81
<b>Cuadro 16.</b> Análisis de varianza para fechas de siembra en Montecillo, Méx. ....	82
<b>Cuadro 17.</b> Comparación de medias de las variables de estudio de las dos fechas de siembra de cada localidad.....	83
<b>Cuadro 18.</b> Comparación de medias de las variables de estudio de las dos fechas de siembra de cada localidad.....	84

<b>Cuadro 19.</b> Análisis de varianza para localidades.....	85
<b>Cuadro 20.</b> Comparación de medias de las variables de las localidades.....	86
<b>Cuadro 21.</b> Comparación de medias de las variables para niveles de riego por localidad.....	87
<b>Cuadro 22.</b> Análisis de varianza combinado de los datos de los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades. ....	88
<b>Cuadro 23.</b> Comparación de medias de las variables estudiadas en los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades.....	89
<b>Cuadro 24.</b> Comparación de medias de las variables de los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades para niveles de riego.....	90
<b>Cuadro 25.</b> Análisis de varianza de los experimentos combinados.....	92
<b>Cuadro 26.</b> Componentes principales: global, por localidad, y por ambientes.....	95
<b>Cuadro 27.</b> Regresión paso a paso para localidades. ....	101
<b>Cuadro 28.</b> Regresión paso a paso para niveles de riego. ....	101
<b>Cuadro 29.</b> Diferencia promedio en °C de las temperaturas máximas y mínimas entre las dos fechas de siembra de Celaya, Gto. ....	120
<b>Cuadro 30.</b> Diferencia promedio en °C de las temperaturas máximas y mínimas entre las dos fechas de siembra de Montecillo, Méx.....	126

## LISTA DE CUADROS-APÉNDICE

Página

<b>Cuadro 1A.</b> Comparación de medias de las variables por genotipos y por cada localidad.....	190
<b>Cuadro 2A.</b> Comparación de medias de las variables por genotipos considerando las cuatro fechas de siembra.....	192

## LISTA DE FIGURAS

### Página

<b>Figura 1.</b> Temperatura máxima <i>maximorum</i> , mínima <i>minimorum</i> , y precipitación acumulada de cada decena durante el ciclo de cultivo, a) primera fecha de siembra y b) segunda fecha de siembra en Celaya. S= siembra, E= espigamiento, MF=madurez fisiológica.....	67
<b>Figura 2.</b> Temperatura máxima <i>maximorum</i> , mínima <i>minimorum</i> y precipitación de cada decena durante el ciclo de cultivo, a) primera fecha de siembra y b) segunda fecha de siembra en Montecillo. S= siembra; E= espigamiento; MF=madurez fisiológica. ....	68
<b>Figura 3.</b> Contenido de humedad edáfica en dos profundidades (0-30, 30-60 cm) bajo riego normal (NR1) y bajo riego limitado (NR2) de la primera fecha de siembra en Celaya. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica. ....	70
<b>Figura 4.</b> Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-30 cm, 30-60 cm) en el NR1 y NR2 de la segunda fecha de siembra en Celaya. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.....	71
<b>Figura 5.</b> Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-10 cm, 10-30 cm) en el NR1 y NR2 de la primera fecha de siembra en Montecillo. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica. ....	72
<b>Figura 6.</b> Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-10, 10-30 cm) en el NR 1 y NR2 de la segunda fecha de siembra en Montecillo. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.....	73
<b>Figura 7.</b> Rendimiento de grano como promedio de los cuatro ambientes por cada genotipo. G= genotipos: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. .	91
<b>Figura 8.</b> Regresión lineal simple del rendimiento de grano sobre la eras de liberación de las variedades en promedio de los cuatro ambientes de evaluación. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	96
<b>Figura 9.</b> Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano bajo riego normal=1 y limitado=2. NR= nivel de riego. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	97
<b>Figura 10.</b> Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano en Celaya y Montecillo. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	98

<b>Figura 11.</b> Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano en las dos fechas de siembra (FS) de Celaya (Loc 1) y de Montecillo (Loc 2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	99
<b>Figura 12.</b> Correlaciones entre las variables de estudio. AP = altura de planta, CL1 = contenido de clorofila antes de llenado de grano para Montecillo y contenido de clorofila en floración para Celaya, CL2 = contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano para los ambientes 1, 3, y 4, y contenido de clorofila en espigamiento para el ambiente 2; TD = temperatura del dosel en ° C, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m <sup>-2</sup> , EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano, PHL = peso hectolítrico en kg hL <sup>-1</sup> , RG = rendimiento de grano en kg ha <sup>-1</sup> .....	100
<b>Figura 13.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la altura de planta. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	102
<b>Figura 14.</b> Relación lineal ajustada entre la era de liberación y el contenido de clorofila antes del llenado de grano. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	103
<b>Figura 15.</b> Relación cuadrática bajo riego normal, y lineal bajo riego limitado entre la era de liberación y el contenido de clorofila en el llenado de grano. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	104
<b>Figura 16.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la longitud de espiga bajo riego normal (1) y bajo riego limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020 .....	105
<b>Figura 17.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el número de espiguillas por espiga bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	106
<b>Figura 18.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el peso de mil granos bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	107

<b>Figura 19.</b> Relación cuadrática (regresión polinomial) ajustada entre la era de liberación y el número de espigas por metro cuadrado bajo riego normal. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	108
<b>Figura 20.</b> Relación lineal ajustada entre la era de liberación y la tasa de llenado de grano bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	109
<b>Figura 21.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la biomasa bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	110
<b>Figura 22.</b> Relación lineal ajustada entre la era de liberación y el número de granos por metro cuadrado bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	111
<b>Figura 23.</b> Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el índice de cosecha riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.....	112
<b>Figura 24.</b> Interacción de las eras por niveles de riego (NR) sobre rendimiento de grano. NR: 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	113
<b>Figura 25.</b> Interacción de los genotipos por niveles de riego sobre rendimiento de grano. NR= nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado, G= genotipo: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.....	114
<b>Figura 26.</b> Interacción entre 4 genotipos seleccionados y los niveles de riego sobre rendimiento de grano. NR= nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado, G= genotipos: 11=Baviacora M92, 14=Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16=Borlaug 100 F2014.....	115
<b>Figura 27.</b> Interacción entre eras y fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Celaya. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. ....	116
<b>Figura 28.</b> Interacción de genotipos por fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Celaya. G= genotipos: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete	

Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014..... 117

**Figura 29.** Unidades calor acumuladas de cada genotipo en la primera (FS1) y segunda fecha de siembra (FS2) en Celaya, Gto. 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014. 118

**Figura 30.** Gráfica de caja de diferencias entre las unidades calor acumuladas por los genotipos en la primera y segunda fecha de siembra en Celaya, Gto.....119

**Figura 31.** a) Temperaturas máximas durante el periodo de llenado de grano de la variedad Bacorehuis F2015 en la primera fecha de siembra (PLLG-1) y segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Celaya. b) Temperaturas mínimas durante el periodo de llenado de grano de Bacorehuis F2015 en la primera fecha de siembra (PLLG-1) segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Celaya..... 121

**Figura 32.** Interacción entre eras y fechas de siembra (FS) en Montecillo por rendimiento de grano. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020. .... 122

**Figura 33.** Interacción entre genotipos por fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Montecillo. G= genotipo, 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014 ..... 123

**Figura 34.** Unidades calor acumuladas de cada genotipo en la primera (FS1) y segunda fecha de siembra (FS2) en Montecillo, Méx. 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014. .... 124

**Figura 35.** Gráfica de caja de diferencias entre las unidades calor acumuladas por los genotipos en la primera y segunda fecha de siembra en Montecillo, Méx. .... 125

**Figura 36.** a) Temperaturas máximas durante el periodo de llenado de grano de la variedad Bacorehuis F2015 de la primera (PLLG-1) y segunda fecha en Montecillo (PLLG-2). b) Temperaturas mínimas durante el periodo de llenado de grano de Bacorehuis F2015 de la primera (PLLG-1) y segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Montecillo.....127

**Figura 37.** Variedad Nana F2007 de la primera fecha de siembra en Montecillo, repetición 2. a) Bajo riego normal y b) limitado.....130

**Figura 38.** Variedad Seri M82 de la segunda fecha de siembra en Montecillo, repetición 1, el día 10 de abril. a) Bajo riego normal y b) limitado.....131

## 1. INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético del trigo (*Triticum aestivum* L.) en México estuvo enfocado durante mucho tiempo a lograr la resistencia a enfermedades y aumentar el rendimiento de las nuevas variedades por unidad de superficie, particularmente en áreas de riego (Villaseñor-Mir *et al.*, 2004). Por iniciativa del ingeniero Rodolfo Moreno Gálvez, en la década de los setenta, el mejoramiento también se enfocó en lograr buen rendimiento de las variedades en niveles limitados de humedad edáfica, incluyendo las áreas de temporal (Moreno, 1992). En ambos casos: riego y temporal, las variedades desarrolladas debían ser útiles no sólo para un sitio específico sino para muchos sitios que compartieran condiciones similares de clima, suelo, etc., por lo que fue necesario incorporar estabilidad a los genotipos (Huerta-Espino *et al.*, 2011). Después del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) una alta calidad ha sido requerida para comercializar variedades mexicanas de trigo harinero en México y el mundo (Figuroa, 2012). En este panorama, la tarea de mejoramiento para temporal y riego limitado se ha vuelto algo muy complejo al tener que considerar además: la resistencia aumentada para nuevas razas de patógenos, elevar la calidad de grano y el rendimiento, y hacer las plantas más resistentes a sequía. Aun así hay evidencias de un progreso genético en el rendimiento de grano tanto para condiciones de riego limitado como para condiciones de riego (Lantican *et al.*, 2001). La falta de agua causa cambios en los procesos fisiológicos que generalmente limitan la eficiencia de la planta para acumular foto asimilados en el grano a consecuencia del daño y afectación del área foliar, materia seca total, periodo de llenado de grano, el número de granos, el peso 1000 granos, el rendimiento, y la

calidad (Hochman, 1982; Aggarwal y Sinha, 1984; Gupta *et al.*, 2000; Shah y Paulsen, 2005).

La urgencia de lograr un mayor rendimiento en áreas con riego limitado, surge de la previsión de un desabasto del trigo a nivel mundial y en México, en parte por los efectos del cambio climático y la escasez del agua para riego. La situación es más delicada en México dado que el trigo es el segundo cereal más consumido después del maíz (SAGARPA, Comité Nacional Sistema-Producto, FIRCO, COLPOS, 2010), pero 55.2 % del producto es importado (CANIMOLT, 2014) y la presión sobre el recurso hídrico en las principales zonas productoras de trigo es alta (CONAGUA, 2013) dados el déficit de agua en las presas (Mendoza *et al.*, 2004), la sobreexplotación de los acuíferos, y el uso ineficiente de este recurso por parte del sector agrícola (CONAGUA, 2012 a-e; CONAGUA, 2015b). Es por ello que se está limitando el número de riegos aplicados al cultivo de trigo, por ejemplo a 3 y 2 en la zona de El Bajío (Solís *et al.*, 2013).

México se ha unido a la estrategia del Consorcio para el Rendimiento de Trigo y su objetivo a 10 años es elevar la producción 10 % en la misma superficie ocupada actualmente por este cultivo. En esta dirección, resulta valioso explorar el germoplasma elite del pasado y del presente para visualizar cómo se han comportado, a través del tiempo, los caracteres cuya heredabilidad y correlación es alta con el rendimiento de grano bajo riego normal y cómo esta asociación se ve afectada bajo riego limitado. Ello con la intención de precisar qué indicadores guían el fitomejoramiento en riego limitado y si estos indicadores predominan en las variedades del presente.

## **1.1 Objetivo**

El objetivo de la presente investigación fue probar en dos localidades, dos niveles de riego, y dos fechas de siembra dentro de cada localidad, un grupo de variedades liberadas en un periodo de años para tener idea de los avances logrados en el mejoramiento de trigo y de las interacciones de los genotipos con ciertos factores ambientales.

## **1.2 Hipótesis**

1. Hay efecto del mejoramiento genético en los genotipos a través de los años.
2. Hay efecto de la interacción de los genotipos con los factores ambientales.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Mejoramiento genético de trigo (*Triticum aestivum* L.) en México

#### 2.1.1 Situación del mejoramiento de trigo antes de la Revolución Verde

En la década de 1940 las siembras comerciales de trigo en temporal estaban ubicadas en Puebla, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y Querétaro, y las de riego en Guanajuato, Michoacán, Jalisco, Chihuahua, Sonora, entre otros. En estas áreas eran cultivadas distintas variedades juntas que se caracterizaban por tener pocos macollos y espigas chicas con pocos granos, y no eran usados fertilizantes inorgánicos. El rendimiento promedio nacional “era de alrededor de 600 kg ha<sup>-1</sup>” (Rodríguez, 1992). En este escenario, ocurrió también el aumento de la población de 15.2 millones en 1925 a 24,8 millones en 1949 y de la demanda de grano de trigo, cuyo germoplasma era de base genética limitada que impedía avances genéticos por lo que el rendimiento estaba estancado (Borlaug, 1968; Rodríguez 2000).

La primera estrategia previa a la Revolución Verde, fue generar una mayor diversidad genética a través de introducciones de Estados Unidos, Canadá, Italia, Argentina, y España que fueron evaluadas durante dos o tres ciclos agrícolas; sin embargo, las que eran de hábito invernal no prosperaron por falta de frío y las de primavera resultaron ser muy afectadas por las royas. El ingeniero Edmundo Taboada realizó cruces entre estos materiales sin resultados favorables (Huerta-Espino *et al*, 2011).

Otro esfuerzo previo fue el que realizó en 1930 el ingeniero David Ibarra quien inició la investigación en el Bajío con variedades importadas, de las cuales los mejores cruzamientos obtenidos en 1934 fueron 'Marroquí' x 'Hope', 'Marquis' x 'Hope', y 'Marquis' x 'Federation'. Con tales cruzamientos se perseguía obtener variedades con altos rendimientos, con amplia área de adaptación, resistentes a enfermedades, y de buena calidad (Fernández, 1934; Hernández, 1984; Moreno, 1992). Dos años después, el ingeniero Taboada colectó semillas de variedades criollas y las evaluó en 1938, año cuando organizó la Oficina de Campos Experimentales (OCE) (Rodríguez, 2000).

### **2.1.2 El proyecto de modernización agrícola**

A inicios de la Segunda Guerra Mundial, el vicepresidente de Estados Unidos, Henry Wallace, preocupado por el desabasto de maíz en México (en contraste con su diversidad genética) y el riesgo de la diseminación de la roya del trigo a territorio americano, se reunió con personal de la Fundación Rockefeller (FR) para sugerir el apoyo al desarrollo agrícola mexicano. Harry Miller de la FR contactó al ingeniero Marte R. Gómez, Secretario de Agricultura y Fomento, quien aceptó la ayuda y ofreció cooperación. La FR envió una Comisión de Reconocimiento a México con el fin de detectar problemas agrícolas (Ortoll, 2003). El diagnóstico realizado reveló que las variedades de maíz, frijol, y trigo eran obsoletas, las semillas estaban mezcladas, eran susceptibles a patógenos, y no responderían a la aplicación de fertilizantes inorgánicos (Rodríguez, 1990).

En 1943 la ayuda de la FR fue formalizada mediante un convenio con el Gobierno Mexicano y así surgió la Oficina de Estudios Especiales (OEE) que dio importancia especial a la producción y mejoramiento de granos básicos (Jiménez, 1990).

La OEE colectó trigos criollos en todas las regiones trigueras e importó nuevas variedades. Estos materiales fueron evaluados en los ciclos otoño- invierno y primavera-verano y seleccionados para formar el primer vivero de evaluación de la roya del tallo (*Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. & E. Henn). En 1944 el banco de semillas de México contaba sólo con 38 entradas (aunque anteriormente ya se habían coleccionado 300 variedades criollas) con las cuales se pretendía lograr resistencia a la roya del tallo que era el problema más apremiante de los productores (Hanson *et al*, 1982; Moreno, 1988; Rodríguez, 2000). El método de mejoramiento usado fue la retrocruza entre variedades criollas e introducidas, utilizando como progenitores recurrentes a las variedades criollas (Rodríguez, 2000).

En 1944 Norman E. Borlaug, fitopatólogo y genetista, tomó el liderazgo del programa de mejoramiento; él y su equipo emprendieron dos estrategias con el fin de acortar el tiempo que llevaba el mejoramiento convencional que era de 10 a 12 años. La primera estrategia fue identificar cuatro variedades introducidas de utilidad a las necesidades de los productores y así después de un año de prueba fueron liberadas las primeras variedades para México: 'Kenya 324', 'Kenya 321', 'Supremo 211', y 'Frontera 209' con buena resistencia a roya del tallo y mejor rendimiento que los trigos locales. La segunda estrategia fue trabajar dos ciclos agrícolas por año (Hanson *et al.*, 1982) combinando latitud-altitud (Borlaug, 1986); dicha metodología implicó la introducción y

selección de genes para insensibilidad al fotoperiodo (*Ppd1* y *Ppd2*) en ambientes contrastantes (Rajaram y van Ginkel, 1997).

Desde ese entonces las poblaciones segregantes han sido mejoradas entre Ciudad Obregón, Sonora durante el invierno, y Toluca y Chapingo, Estado de México durante el verano. Dichas localidades son opuestas en latitud, altura sobre el nivel del mar, fotoperiodo, temperatura, precipitación, y suelo (Rajaram y Morgounov, 1995). Esto ha permitido a los mejoradores lograr una amplia adaptación de los materiales, lo que no podría lograrse en Estados Unidos debido a las muy bajas temperaturas prevalecientes en invierno (Comunicación personal Dr. Villaseñor, 13 febrero 2015); además con este método fue posible formar variedades rendidoras y con un amplio espectro de resistencia a las enfermedades (Borlaug, 1970).

En 1945 el medio millón de hectáreas sembradas todavía presentaban plantas con las mismas características que las traídas por los españoles: altas, tallos débiles, y susceptibles a las principales royas (Hanson *et al*, 1982). El Dr. Borlaug y el Dr. Rupert (1949) observaron que había en México tres especies distintas de roya en México, de las cuales la del tallo era la más destructiva, seguida por la roya de la hoja (*Puccinia triticina* Erikson); ambas reducían el rendimiento de todos los trigos harineros en forma considerable. Los investigadores identificaron que la roya lineal (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) era destructiva en zonas frías y altas. De las primeras variedades liberadas, 'Rocamex 211' también llamada 'Supremo 211' combinó la resistencia a las razas locales de las tres royas.

Las primeras variedades liberadas para México fueron cruzadas con los genotipos mexicanos 'Candéal' y 'Pelón', y con los genotipos introducidos 'Marroquí', 'Mentana', 'Newthatch', 'Regent', y 'Renown' (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

En 1947 fueron liberadas en el noroeste las variedades 'Barrigón Yaqui', 'Kenya 324' y 'Gabo' con las que se enfrentó el problema de la roya del tallo y de la hoja (Camacho *et al.*, 1980).

En 1948 la OCE fue reorganizada y cambió su nombre por Instituto de Investigaciones Agrícolas (IIA), el que posteriormente liberó las variedades 'Nazas 48', 'Noroeste', y 'Constitución' (Márquez, 1977; Rodríguez, 2000).

El equipo de trabajo usó el método genealógico y las cruza simples para liberar en 1949 variedades resistentes a la roya del tallo: 'Yaqui 48', 'Chapingo 48', y 'Kentana 48' (Huerta-Espino *et al.*, 2011) las cuales maduraban dos semanas antes que el resto de genotipos lo que permitió extender el área cultivada con la cantidad ya dada de agua para riego (Borlaug, 1954).

En los años 1953 y 1954 las variedades recién liberadas como 'Yaqui 50' y 'Lerma 50' presentaron susceptibilidad a nuevas razas de la roya del tallo, por lo tanto dejaron de ser recomendadas. Ante este problema el Gobierno mexicano organizó y ejecutó un Programa de Emergencia a raíz del cual fueron liberadas las variedades 'Chapingo 52', 'Toluca 53', 'Yaqui 53', 'Lerma Rojo', 'Kentana 54', 'Gabo 54', 'Yaqui 54', y 'Mayo 54', todas ellas resistentes a las razas 15B y 139, y a otras comunes en esa época (Rodríguez, 1992).

En 1955 el mejoramiento de trigo en el noroeste fue fomentado y tuvo como objetivos obtener variedades resistentes al acame, a las royas y con alto rendimiento y calidad (Camacho *et al.*, 1980).

De 1948 a 1960 fueron liberadas 20 variedades cuyas características eran ser plantas altas, algo más rendidoras, de maduración más temprana y más resistentes a enfermedades (Hanson *et al.*, 1982). Sin embargo, su rendimiento llegó a un tope debido al acame al fertilizar con dosis altas de nitrógeno. La solución al problema de acame se inspiró en el caso del sorgo (*Sorghum bicolor* L.) cuyo porte fue reducido (Márquez, 1977) y en el caso de trigo pudo lograrse cuando en 1953 el Dr. Borlaug recibió semillas de la cruce 'Norin 10' x 'Brevor'. 'Norin 10' provino de una selección de trigos semienanos llamada Tohoku No. 34 y que después de varias pruebas fue liberada en 1935 en Japón, mientras que 'Brevor' fue liberada en Estados Unidos en 1949 (Dalrymple, 1986). Los genes del enanismo de origen japonés son llamados *Rht1* y *Rht2*, si cualquiera de los dos está presente la reducción en altura es 40 cm, si ambos están presentes la reducción es 55 cm (Rajaram y Morgounov, 1995).

Estos genes fueron transferidos por el método de retrocruzamiento a las variedades comerciales (Márquez, 1977) en 1955. Al inicio la progenie tuvo un alto grado de esterilidad masculina, los granos eran arrugados, suaves en textura y de gluten débil, además, heredaron de sus progenitores 'Norin' X 'Brevor' gran susceptibilidad a la roya del tallo y de la hoja. Con el fin de superar estos problemas fue aplicada una fuerte presión de selección en varios tipos de cruces (Borlaug, 1986). En la dirección de producir el acortamiento de las plantas, también se logró mayor amacollamiento, más granos por espiga, más granos por metro cuadrado, un mayor índice de cosecha, así

como el uso más racional de los fertilizantes y la humedad del suelo (Hanson *et al.*, 1982), con lo cual el rendimiento aumentó más de 4500 kilogramos y hasta 8000 kilogramos por hectárea en el noroeste (Villaseñor, 2000) mientras que el rendimiento medio nacional pasó de 838 kilogramos por hectárea durante 1945-49 a 2582 kilogramos por hectárea en 1965-69 (Villaseñor *et al.*, 2009).

La política de dar impulso a la infraestructura e investigación convirtió al noroeste en la principal zona productora de trigo de México pero a pesar del aumento del rendimiento, el número de molinos y la superficie cosechada a partir de 1960 fueron disminuyendo (Sánchez *et al.*, 1984).

### **2.1.3 Colaboración nacional e internacional para el mejoramiento de trigo en México**

En 1961 la OEE y el IIA fueron unidos para formar el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) (Gaona y Barahona, 2001) enfocado a la investigación para atender la agricultura nacional. Posteriormente en 1966, en el marco de la extensión del dominio económico de los países industrializados sobre los países agrarios (que se convertirán en importadores netos) fuente de materias primas, alimentos, energía (Jiménez, 1990), y biodiversidad, fue fundado el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) dedicado al intercambio internacional de información y material genético para mejorar la producción de alimentos.

Para el CIMMYT, como uno de los centros internacionales en investigación agrícola, el establecimiento de viveros en lugares estratégicos a nivel mundial ha jugado

un papel importante en el intercambio de germoplasma y en la promoción de la cooperación con una red global de científicos (Rajaram *et al.*, 2002).

Siguiendo con la investigación y como resultado de probar el material segregante en ambientes más contrastados, fueron liberadas 'Pénjamo 62', 'Pític, 62', 'Lerma Rojo S64', 'Sonora 64', y 'Siete Cerros' con tan amplia adaptación que fueron sembradas en diversas partes del mundo dando inicio a la Revolución Verde (Villaseñor, 2000).

No obstante el apogeo de trigo bajo riego y las críticas de especialistas y directivos de investigación (Villaseñor, 2000), los trabajos de mejoramiento de trigo para temporal los inició y dirigió el ingeniero Rodolfo Moreno Gálvez (jefe del departamento de cereales del INIA) en 1968 como una solución para aumentar las áreas de cultivo de trigo dada la competencia con cultivos más redituables de riego (Moreno, 1992) y dados los hechos que apuntaban hacia un mayor desabasto de agua para riego en el futuro. Partiendo de las mejores líneas avanzadas y variedades disponibles, fue realizada una prueba en 8 localidades de temporal. De esta prueba resultó que el porte bajo de las variedades semienanas fue una desventaja en lugares con sequía (Villaseñor *et al.*, 2009).

Desde 1969 CIMMYT e INIA (después Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas, y Pecuarias, INIFAP) han colaborado y unido sus fortalezas en la investigación en mejoramiento genético de trigo para tres áreas del país: 1) las zonas irrigadas del norte, noroeste y noreste; 2) las zonas con riego de El Bajío y centro; 3) y las áreas de temporal y lugares secos de las partes altas (Villaseñor *et al.*, 2009; Huerta-Espino *et al.*, 2011). Al inicio el CIMMYT dedicó sus esfuerzos sólo a áreas de riego en

México pero en otros países ya había empezado investigaciones en ambientes calurosos y secos.

#### **2.1.4 Mejoramiento de trigo para las zonas irrigadas del norte**

Los objetivos del mejoramiento genético para desarrollar variedades destinadas al noreste durante los años setentas y ochentas fue mejorar simultáneamente el rendimiento, estabilidad, adaptación, calidad, y resistencia a enfermedades (Huerta-Espino *et al.*, 2011). Adicionalmente era prioridad para el CIMMYT ampliar la base genética del programa por lo cual realizó en los setenta en Cd. Obregón miles de cruza simples, dobles, y triples, así como cruza de trigos de invierno con trigos de primavera para seleccionar trigos de primavera con un nuevo tipo agronómico, mayor potencial de rendimiento, y resistencia a septoriosis (*Septoria tritici* Rob. in Desm.). A fin de lograr la estabilidad del rendimiento, el CIMMYT desarrolló variedades multilíneas a partir de líneas casi idénticas con amplia adaptación y alto rendimiento pero con diferentes genes de resistencia a roya (CIMMYT, 1974 y 1975). Uno de los factores que más contribuyó a obtener líneas avanzadas con amplia adaptación y estabilidad fue la translocación 1BL/1RS. Esta translocación fue detectada en el brazo corto del cromosoma 1R de arroz, el cual lleva genes de resistencia a la roya de la hoja, del tallo y lineal (*Puccinia striiformis* Westend.), cenicilla (*Erysiphe graminis* DC. f. sp. *tritici* Marchal), virus mosaico rayado del trigo (American Wheat Striate Mosaic Virus, AWSMV), y pulgón verde (*Schizaphis graminum*) aún más, los genotipos con esta translocación rinden 4.3 y 4.2 % más bajo condiciones óptimas y riego reducido respectivamente (Villareal, 1995).

A inicios de los años ochenta los investigadores preferían usar el método genealógico y evaluaban las poblaciones segregantes en diferentes ambientes propicios para ciertas enfermedades (Huerta-Espino *et al.*, 2011). El método genealógico fue reemplazado en 1985 por el método genealógico modificado que consiste en seleccionar plantas individuales desde la F<sub>2</sub> seguido por selección masal (bulk selection) hasta la F<sub>5</sub>, y selección individual en la F<sub>6</sub>. A diferencia de la selección en masa, en la masal la selección es natural por ello el ambiente de selección es muy importante. Desde finales de los años noventa y hasta ahora ha sido aplicado el método masal seleccionado (selected bulk method), en el que “las espigas de plantas F<sub>2</sub> seleccionadas dentro de una cruzas son cosechadas y trilladas juntas” de modo que se obtiene un lote F<sub>3</sub> de semilla seleccionada por cruzas; este proceso continua hasta la F<sub>5</sub> y en la generación F<sub>6</sub> es aplicada la selección individual (Ortíz *et al.*, 2007).

En 1985 cuando aún estaba describiendo los mega-ambientes en los que basar su mejoramiento, el CIMMYT puso énfasis en el mejoramiento de la resistencia a royas, cenicillas, y septoria para zonas irrigadas (Rajaram *et al.*, 1988).

La estrategia del CIMMYT para lograr resistencia durable se ha basado en una resistencia básica diversificada mediante la “acumulación de varios genes menores combinándolos con diferentes genes específicos” (Rajaram, 1995).

En 1988 el CIMMYT definió un mejoramiento con base en mega-ambientes o zonas agroecológicas en los que agrupó extensiones de tierra por su suelo, clima, flora, y características socioeconómicas, y de acuerdo a cada mega-ambiente estableció objetivos. Ciudad Obregón está incluida en el mega-ambiente uno caracterizado por ser

una zona irrigada con temperatura templada durante el ciclo de cultivo y donde los principales objetivos eran lograr la resistencia a acame y al calor, a la roya del tallo, de la hoja, y lineal, y lograr un mejor equilibrio de gluteninas de alto peso molecular las cuales están involucradas en la fuerza del gluten (Pingali y Rajaram, 1999; Rajaram *et al.*, 2002).

Tras la puesta en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, los productores del sur de Sonora redujeron su producción de trigo harinero por los altos costos de producción y de transportación, por la presencia del carbón parcial (*Nevossia indica*), y por la baja calidad. El resultado fue que no pudieron competir con los productores de Estados Unidos y Canadá. El INIFAP ha contribuido a elevar la competitividad nacional seleccionando por calidad, rendimiento, y resistencia a enfermedades (Figueroa, 2012). Es necesario seguir mejorando la calidad de las variedades mexicanas sobre todo en lo que concierne al contenido de proteína que parece tener una correlación negativa con muy altos rendimientos. Juntar ambos caracteres fue posible ya en las variedades 'Kronstad 2004' y 'Tollocan 2005' (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

En años recientes ha sido usada la translocación T7D5.7DL-7Ae#1L encontrada en *Thinopyrum elongatum* y que lleva los genes *Lr19* y *Sr25* de resistencia a roya de la hoja y del tallo respectivamente a fin de impulsar el aumento del rendimiento en zonas irrigadas (Singh *et al.*, 2007).

### **2.1.5 Mejoramiento genético para El Bajío**

El programa de mejoramiento genético para trigos de riego en El Bajío en los años noventa tenía como objetivo liberar variedades superiores en calidad industrial y comportamiento agronómico a las variedades testigo, rendir experimentalmente 9000 kg ha<sup>-1</sup>, madurar en 120 días máximo con tal solo tres riegos, no rebasar los 90 cm de altura, producir un rendimiento mínimo de harina 76 %, y rendir adecuadamente en condiciones de temporal. La metodología usada fue el genealógico con selección intrafamiliar en las primeras generaciones e interfamiliar en las avanzadas (Salazar *et al.*, 1993).

Actualmente el programa de mejoramiento en El Bajío – Campo Experimental Bajío (CEBAJ) tiene como objetivos aumentar la precocidad y el potencial de rendimiento, además de lograr mayor tolerancia al acame y conservar características de buena calidad (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

Ante la menor disponibilidad de agua en las presas y la sobreexplotación de los acuíferos en Guanajuato, el CEBAJ también busca liberar variedades de los diferentes grupos de calidad industrial que sean capaces de hacer un menor uso del agua y al mismo tiempo rendir más que las variedades comerciales de la región (Solís *et al.*, 2013).

### **2.1.6 Mejoramiento de trigo para áreas de temporal**

El mejoramiento en 1969-70 para producir variedades para temporal se realizó primero en los Valles Altos y el Bajío y tuvo los siguientes lineamientos: producir el germoplasma de todas las generaciones con riego limitado o bajo condiciones de temporal, usar el método de selección masal, usar como criterios de selección la precocidad, tipo agronómico (longitud y fertilidad de espiga, altura de planta, uniformidad de las espigas, grado de amacollamiento) y resistencia a enfermedades, y trabajar dos

ciclos al año en diferentes altitudes, latitudes, y fotoperiodo con lo cual fueron incorporadas la estabilidad en los genotipos. De este esfuerzo resultaron las primeras variedades para temporal registradas en 1974 ('Zacatecas VT74', 'Cleopatra VS74', 'Chapingo VF74', y 'Narro VF74') (Moreno, 1992; Villaseñor y Espitia, 2000; Huerta-Espino *et al.*, 2011).

El programa de mejoramiento para áreas de temporal utilizó los materiales avanzados por el CIMMYT enfocándose a añadirles precocidad, tolerancia a sequía, y resistencia a enfermedades (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

A finales de los sesenta y comienzos de los setenta, las variedades generadas para áreas de riego del proyecto de mejoramiento alternado (efectuado en Ciudad Obregón, Sonora y en el Valle de Toluca, Estado de México) con alto potencial de rendimiento, aptas para sembrarse en diversos sitios, y sin interacción significativa con el ambiente fueron adoptadas en regiones semiáridas. En 1974-1975 el CIMMYT inició el mejoramiento y experimentación en aras de lograr la resistencia a sequía, la metodología incluyó ensayar todas las generaciones bajo riego reducido o en áreas de temporal en México (Rajaram, 1989). Esta metodología coincidió con la que el INIA planteó primeramente.

En 1978-79 el programa de mejoramiento para temporal del INIA decidió cambiar la estrategia: someter el germoplasma a condiciones más extremas de sequía tanto reduciendo el número de riegos (la aplicación de dos riegos en Roque fue llamada riego restringido) como evaluando en lugares de temporal crítico como los de Calera, Zacatecas o el norte de Guanajuato; con el cambio de estrategia surgieron las variedades

'México M82' y 'Mixteco S82' ambas precoces y con buena respuesta en ambientes críticos de producción pero sin suficiente resistencia a enfermedades (Villaseñor y Espitia, 2000; Villaseñor *et al.*, 2009).

A inicios de la década de 1980 el CIMMYT inició un programa organizado de mejoramiento para sequía con siembras en Huamantla y el Valle del Yaqui como ambientes limitados en humedad y a la par con pruebas de líneas avanzadas usando sistemas de riego que pudieran crear una variación de déficit hídrico (Rajaram y Morgounov, 1995).

De 1970 a 1980 el CIMMYT utilizó la translocación 1B/1R de trigo y centeno (variedad 'Kavkaz') y aprovechó el patrimonio genético del trigo de invierno incluyendo entre sus atributos la resistencia mejorada a sequía en cruzas de trigo de primavera x trigo de invierno con el fin de aumentar el rendimiento (Rajaram *et al.*, 1992; Kronstad y Scott, 1992). Las cruzas de trigos semienanos de primavera con trigos de invierno fueron practicadas desde finales de la década de 1960, de tales cruzas la más exitosa fue Veery pues sus líneas tienen un significativo mayor número de granos y biomasa comparadas con otros materiales modernos (Pingali y Rajaram, 1999). 'Veery S' fue probada en numerosos lugares a nivel internacional y la mayoría de ellos fueron semiáridos. En 1981 los datos de las pruebas demostraban que tenía alto rendimiento en medios óptimos, y aceptable en condiciones semiáridas. Este comportamiento que revela la presencia de genes de resistencia fincó la base de los objetivos del mejoramiento para zonas semiáridas (Rajaram, 1989). Los trigos 'Veery' y su progenie (incluyendo la línea 'Baviacora') demuestran un desempeño superior bajo sequía y calor, y son más eficientes en el uso de nitrógeno y fósforo (Pingali y Rajaram, 1999).

En 1982 el INIA implementó la prueba más severa de selección de material segregante bajo humedad residual cuya inspiración fueron los trigos “aventureros” de la mixteca oaxaqueña, asimismo en ese año fue establecido el Ensayo de Trigo para Temporal Zona Centro (ETTZC) (Moreno, 1992; Villaseñor *et al.*, 2004).

En 1985 fueron fusionados los Institutos Nacionales de Investigación Agrícola (INIA), Pecuaria (INIP), y Forestal (INIF) y formaron el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) (Rodríguez, 1990) que continuó su labor y puso en marcha el ETTZC en ese año (Moreno, 1992) en 8 estados del país y en 1986 en 12 estados (Villaseñor *et al.*, 2009) donde fueron evaluadas las líneas avanzadas Garambullo “s” y Junco “s” liberándose en 1987 con los nombres de ‘Temporalera M87’ y ‘Gálvez M87’ respectivamente (Villaseñor *et al.*, 2003). ‘Temporalera M87’ fue una variedad sobresaliente y considerada todavía en el año 2004 como el material más adecuado para temporal (sobre todo para ambientes favorables y críticos) por su tolerancia a sequía (Villaseñor *et al.*, 2003; Villaseñor *et al.*, 2004), y ahora sirve como punto de comparación para evaluar nuevas variedades de temporal. ‘Gálvez M87’ fue una línea formada para condiciones de riego limitado por el Programa de Mejoramiento Genético de Trigos Harineros del CIMMYT y seleccionada por el Programa para Temporal del Campo Experimental Valle de México (Villaseñor y Espitia, 2000).

Dado que el trigo era cultivado en 13 estados con un amplio espectro de variación en sus condiciones ambientales, era impráctico liberar variedades específicas para cada nicho agroecológico por eso, y dado que en 1989 fue reconocida la importancia del Programa de Temporal su impacto fue extendido a través de la implementación a nivel nacional del Ensayo Uniforme de Trigo para Temporal (EUTT) en el que serían

detectados los genotipos más estables a condiciones que se agruparon como críticas, regulares y favorables para la producción, consecuentemente se empezaron a analizar los datos por tipo de ambiente (Moreno, 1992; Villaseñor *et al.*, 2009).

Las condiciones críticas, regulares y favorables de producción fueron definidas en función de la temperatura, cantidad y distribución de la precipitación, humedad relativa, altitud, período de heladas, profundidad y fertilidad del suelo, relieve, y estación de crecimiento; así también fueron delineadas las características que debían tener los genotipos idóneos para cada una de esas tres condiciones (Moreno y Villaseñor, 1993; Villaseñor *et al.*, 2003).

Fruto de los primeros EUTT fue la liberación de la variedad 'Verano S91' que destacó en temporales limitantes (Villaseñor *et al.*, 2009).

En 1996 los programas de mejoramiento de trigo de temporal del INIFAP y del CIMMYT unieron esfuerzos con el objetivo de evaluar conjuntamente en una gran variabilidad de ambientes a nivel nacional sus líneas mediante el Primer Vivero de Selección de Trigos Harineros para Temporal y el Primer Ensayo de Rendimiento de Trigos Harineros para Temporal (Villaseñor y Rajaram, 1998).

Investigadores del INIFAP en colaboración con investigadores del CIMMYT obtuvieron en 1999 cuatro nuevas variedades de trigo harinero para temporal ('Juchi F2000', 'Rebeca F2000', 'Náhuatl F2000', y 'Tlaxcala F2000') cuya resistencia a royas superó a las anteriores y cuyo rendimiento era igual o mejor al de 'Temporalera M87', 'Batán F96' o 'Arandas F90' en ambientes de sequía (Villaseñor *et al.*, 1999). "La variedad 'Nana F2007', después de cuatro años de evaluación en 72 sitios diferentes bajo

condiciones de temporal” mostró “buen rendimiento de grano sobre todo en ambientes de sequía”, su resistencia a roya fue mayor que la de ‘Rebeca F2000’ pero no superó a ésta en resistencia a roya amarilla y en el complejo de enfermedades foliares, aun así parece tener mayor número de genes de resistencia que ‘Rebeca F2000’ (Villaseñor *et al.*, 2008).

Al futuro el programa de mejoramiento genético para temporal tiene planeado evaluar bajo el esquema riego-sequía una amplia base genética y realizar estudios en varias áreas de conocimiento a fin de identificar y acumular los caracteres principales relacionados con la resistencia a sequía. Además, los investigadores están formando poblaciones a partir de las cuales se busca resistencia a sequía, resistencia duradera a patógenos, alto rendimiento, y alta calidad industrial implementando la selección asistida con el uso de androesterilidad (Villaseñor, 2000; Villaseñor *et al.*, 2009).

Actualmente las variedades que han sido liberadas en el pasado son objeto de estudio para su caracterización fisiológica, agronómica, y genómica, con el fin de aprovechar sus atributos para sequía como el caso de la cruce Seri/Babax o C306/HUW206 donde incluso se utiliza la selección asistida con marcadores moleculares (Olivares-Villegas *et al.*, 2007; Kumar *et al.*, 2012).

También están siendo evaluados trigos transgénicos bajo sequía. Por ejemplo, la variedad ‘MPB-Bobwhite26’ fue transformada con el gen *DREB1 A* proveniente de *Arabidopsis thaliana*; después las plantas transgénicas fueron seleccionadas por su sobrevivencia a déficit severo de humedad; finalmente las líneas seleccionadas fueron comparadas con la progenie que no heredó el gen y con plantas de la variedad no

transformadas. Las plantas transgénicas no destacaron bajo déficit de humedad pero bajo riego su rendimiento fue mayor y estable en diferentes ambientes (Saint Pierre *et al.*, 2012).

Otra de las estrategias usadas para lograr adaptación en condiciones limitantes de humedad es la obtención de sintéticos derivados de la cruce del trigo duro moderno como donador del genoma AB con el silvestre pasto cabra, donador del genoma D. Estos sintéticos han sido probados en México y Australia y su rendimiento ha sido mejor que las variedades testigo (Dreccer *et al.*, 2007).

### **2.1.7 Mejoramiento de trigo en la actualidad**

Ante el aumento de la demanda de trigo y los efectos del cambio climático en la producción, el CIMMYT consultó expertos en varias áreas del conocimiento provenientes de instituciones públicas y privadas de más de 30 países. La primera reunión con los expertos culminó en la formación del Consorcio para el Rendimiento de Trigo (WYC por sus siglas en inglés) en noviembre de 2009. La meta es mejorar la estructura física y genética del trigo para elevar 50 % su potencial de rendimiento en el 2030. México se unió a esta estrategia y su objetivo es aumentar la producción de trigo en 350 000 toneladas (10 %) en 10 años, 750 000 toneladas (22 %) en 15 años, y 1.7 millones de toneladas (50 %) en 20 años, en la misma superficie ocupada actualmente para la producción de trigo (Reynolds *et al.*, 2011; CIMMYT, 2012, MasAgro, 2014).

Las estrategias planteadas para acelerar las ganancias genéticas son: a) la hibridación estratégica que combine caracteres complementarios al rendimiento potencial, b) el uso de germoplasma exótico en cruces amplias para complementar

niveles de expresión en el acervo génico convencional, y c) la selección genómica (Reynolds *et al.*, 2011; Reynolds *et al.*, 2015).

El INIFAP contribuye con las iniciativas del CIMMYT y del WYC mediante la evaluación de variedades de alto rendimiento en diferentes áreas de riego de México aprovechando la diversidad en clima, suelo, topografía, altitud, y zonas epidemiológicas que dan información sobre el desempeño y adaptabilidad de tales variedades (Solís-Moya *et al.*, 2015).

Otra forma de incrementar el rendimiento es el uso de genes del enanismo como *Rht13*, el cual reduce la longitud del pedúnculo y del penúltimo entrenudo y cuyo efecto está asociado con el aumento del número de granos (Rebetzke *et al.*, 2011).

El método de dobles haploides está siendo pulido con el fin alcanzar el mismo nivel de avance genético que con el método genealógico en cruzas con una alta variación genética, pero con una mayor rapidez (Ortiz *et al.*, 2007).

En la búsqueda del aumento del rendimiento, otro de los muchos acercamientos, es la identificación de regiones genómicas para la adaptación de las plantas a la densidad de siembra ya que éste es uno de los componentes del rendimiento. En un estudio que realizaron Sukumaran *et al.* (2015) fue identificado un patrón: los genotipos que respondieron mejor bajo competencia intensa, respondieron menos a competencia reducida, pero fueron las mejores líneas considerando toda la parcela.

## **2.2 Medición del avance genético del trigo**

Fischer y Wall (1976) condujeron experimentos en condiciones agronómicas inmejorables en los ciclos 1970-75 en el CIANO (Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste) donde sembraron 15 variedades liberadas en el Valle del Yaqui de 1950 a 1975. El aumento del rendimiento del 40 % fue relacionado con la disminución de la altura de las plantas ya que en el tiempo en que fue realizado este estudio los investigadores estaban viendo claramente el resultado favorable de la introducción de los genes del enanismo. La aplicación de fertilizante nitrogenado sin temor al acame fue una ventaja sobre las plantas altas liberadas anteriormente.

En los ciclos verano de 1982 en Montecillo y Tecámac (Estado de México) e invierno-primavera 1982-83 en Montecillo, Benítez *et al.* (1991) evaluaron bajo riego, temporal y sequía (con riegos uno de nacencia y uno en la etapa de formación de grano) 81 variedades de trigo liberadas de 1947 a 1982. El rendimiento, debido a mejoramiento genético, aumentó 20 %, es decir, 15.2 kg ha<sup>-1</sup> por año como promedio de los tres ambientes, y 42.8 % (47.8 kg ha<sup>-1</sup> por año) donde las condiciones fueron similares a las de liberación. El aumento del rendimiento de las variedades recientes fue asociado con el aumento del índice de cosecha, la relación grano-paja, y con espigas más grandes; además fue asociado con la reducción en altura, biomasa, y los días a antesis.

Hernández (1988) usó también 81 variedades pero liberadas de 1950 a 1982 y cultivadas bajo riego en los ciclos invierno-primavera de 1982-83 y 1983-84 en Roque (Guanajuato) e invierno-primavera de 1983-84 y 1984-85 en Chapingo. Las variedades tuvieron un comportamiento diferente a través de ambientes. El autor estimó la varianza genética comparando las variedades más representativas de cada cinco años con la variedad 'Supremo 211' sembrada comercialmente en 1948 y obtuvo una tasa de

incremento anual del rendimiento de 2 % o alrededor de 60 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El rendimiento de grano se correlacionó positivamente con índice de cosecha, tasa y periodo de llenado de grano, y negativamente con altura de planta.

Para evaluar la ganancia en el rendimiento en el mismo periodo (1950-1982), Waddington *et al.* (1986) establecieron en el Valle del Yaqui (Sonora), en condiciones óptimas de cultivo, dos experimentos uno en 1982-83 y otro en 1983-84, en el primero evaluaron siete genotipos y en el segundo evaluaron esos mismos siete genotipos más otros siete todos adaptados al sitio. La tasa promedio de aumento de rendimiento por año de liberación fue 59 kg ha<sup>-1</sup> (1.1 %) asociada a un mayor número de granos por metro cuadrado que se correlacionó positivamente con mayor fitomasa (peso seco de la parte aérea de la planta). A diferencia de los estudios antes mencionados, en este estudio no hubo correlación entre índice de cosecha y rendimiento de grano.

Sayre *et al.* (1997) midieron el progreso genético del rendimiento potencial comparando ocho variedades de trigo harinero liberados de 1962 a 1988 durante 6 ciclos en condiciones óptimas de cultivo en el CIANO. El rendimiento aumentó linealmente pasando de 6680 kg ha<sup>-1</sup> que obtuvo 'Pitic 62' (la variedad más antigua) a 8475 kg ha<sup>-1</sup> correspondiente a 'Bacanora 88' (la variedad más reciente). La tasa de progreso anual en promedio fue 0.88 %. El rendimiento de grano estuvo muy correlacionado con el índice de cosecha y el número de granos por metro cuadrado. El índice de cosecha estuvo fuerte y negativamente correlacionado con altura de planta, mientras número de granos no estuvo correlacionado fuertemente con número de espigas y número de granos por espiga.

En este mismo estudio la conductancia estomática, la tasa fotosintética máxima, y la depresión de la temperatura del dosel fueron estudiadas y promediadas en tres años. Dichos caracteres se correlacionaron positivamente con el progreso en el rendimiento como promedio de 6 años. Hubo un aumento significativo en la conductancia estomática de las variedades más recientes excepto para 'Oasis 86' y 'Bacanora 88', mismas cuya tasa fotosintética máxima no rebasó a la de 'Seri 82'. El cambio en la tasa fotosintética máxima debido al mejoramiento fue mucho menor que la conductancia estomática, y la temperatura de los doseles fue 0.6 °C más baja (Fischer *et al.*, 1998).

Con datos colectados de lotes de prueba bajo riego en el Valle del Yaqui de 1990 a 2002 de 33 variedades liberadas entre 1962 y 2001, Nalley *et al.* (2010) encontraron que en promedio la mejora genética añadió 38.26 kg ha<sup>-1</sup> que corresponde a un aumento del rendimiento de 0.46 % por año.

Durante 2009-10 fueron establecidos 4 experimentos en el Campo Experimental Norman E. Borlaug (CENEB antes CIANO) en los que fueron evaluadas bajo los ambientes de riego, sequía, calor, y calor-sequía las mejores 26 líneas élite de trigo de primavera liberadas de 1977 a 2008. Los efectos de la fecha de liberación, ambientes e interacciones fueron significativos para rendimiento de grano y peso de mil granos, además el cambio en estos caracteres a través de la fecha de liberación en todos los ambientes fue lineal (Lopes *et al.*, 2012a). Las ganancias genéticas fueron 3.5 g m<sup>-2</sup> (0.7 % anual). Con base a estos experimentos se confirma que los rendimientos del trigo no han alcanzado un nivel estable o tope. Esta investigación extendió su alcance a otros países y genotipos, y mostró evidencia de que en ambientes calientes y secos el carácter granos por metro cuadrado estuvo positivamente asociado con el rendimiento (de

acuerdo con el ambiente), mientras que la temperatura del dosel medida en la fase vegetativa y en fase de llenado de grano estuvo negativamente asociada con rendimiento (de acuerdo con el ambiente) (Lopes *et al.*, 2012b).

Sharma *et al.* (2012) con apoyo en 69 países realizaron Pruebas de Rendimiento de Trigo Élite de Primavera (ESWYT, desarrolladas para áreas muy productivas con riego) en 919 ambientes del año 1995 a 2009 en los que compararon 45 nuevas líneas de trigo harinero, 4 controles del CIMMYT, y uno local. La ganancia en el rendimiento del promedio de las 5 líneas más rendidoras con relación a la media de las pruebas tuvo una caída de 6.7 kg ha<sup>-1</sup> anual debido a que nuevas y mejores entradas están siendo incluidas en las pruebas. Comparando con la variedad 'Attila' en todos los mega-ambientes (ME1, ME2, ME4, ME5) las 5 líneas más rendidoras mostraron una ganancia anual de 27.8 kg ha<sup>-1</sup> (0.65 %).

Un estudio basado en datos del CIMMYT de 25 años en 76 países mostró que no hubo ganancias genéticas en las ESWYT a las más altas temperaturas contrastando con las ganancias fuertes obtenidas en las pruebas de rendimiento de trigo para regiones semi-áridas (SAWYT donde el germoplasma es mejorado específicamente para áreas propensas a la sequía) lo que remarca la importancia de hacer mejoramiento genético con enfoques específicos. Fue observado que el aumento del requerimiento de temperatura durante el periodo vegetativo y altas tasas de llenado de grano pareció favorecer el progreso genético en condiciones de altas temperaturas (Gourdji *et al.*, 2013). Otro estudio realizado con datos de las ESWYT y las SAWYT tomados entre 1979 y 1998, reveló que el progreso en el rendimiento en ambientes que rinden 4 ton ha<sup>-1</sup> o más fue mayor para el germoplasma de las SAWYT que para el germoplasma de las

ESWYT. Por otra parte, el progreso medido en ambientes que rinden menos de 4 ton ha<sup>-1</sup> respecto de las medias de las entradas o genotipos más rendidores fue mayor para las SAWYT pero con respecto de las medias de las pruebas el progreso fue mejor para las ESWYT (Trethowan *et al.*, 2002).

En las SAWYT 1 a 17 correspondientes a los años de 1994 a 2010 fueron evaluadas de 30 a 50 entradas todas mejoradas en México con la metodología latitud-altitud. El progreso genético anual respecto a las medias de las pruebas fue de 1 % y de 1.1 % respecto del 10 % de las mejores líneas comparadas con 'Dharwar Dry' como control. En los sitios de más bajo rendimiento el progreso expresado como porcentaje de 'Dharwar Dry' fue 0.7 % y 0.5 % respecto de las medias de las pruebas y las medias del 10 % de las mejores variedades (Manes *et al.*, 2012).

Por su parte, Huerta-Espino *et al.* (2011) mencionaron que el promedio de las ganancias genéticas bajo temporal obtenidas en un amplio rango de ambientes de producción en México en las cuatro últimas décadas fue 24 kg ha<sup>-1</sup> por año.

Lantican *et al.* (2001) basados en los datos del Vivero Internacional para Rendimiento de los Trigos de Primavera (ISWYN) de 1964 a 1995 y en las ESWYT de 1979 a 1999, revelan que el progreso genético del rendimiento en el periodo de 1964 a 1978 en los ambientes secos (ME4) y en aquellos con alta temperatura (ME5) (1.54 y 1.41 % año<sup>-1</sup> que representan 32.4 y 34.9 kg año<sup>-1</sup>) fue similar al de los ambientes con riego (ME1) y con alta precipitación (ME2) (1.22 y 1.72 % año<sup>-1</sup> que representan 71.6 y 81.5 kg año<sup>-1</sup> respectivamente). Sin embargo, en el periodo de 1979 a 1995 el aumento del rendimiento para ME4 y ME5 fue casi el doble (2.75 y 2.53 % año<sup>-1</sup> que representan

70.5 y 72.3 kg año<sup>-1</sup>) que el aumento del rendimiento para ME1 y ME2 (1.32 y 1.71 % año<sup>-1</sup> que representan 84.6 y 92.8 kg año<sup>-1</sup>), lo cual es congruente con el año en que el CIMMIYT inició sus investigaciones para dichos mega-ambientes. Los datos de las ESWYT y del ISWYN revelan una tendencia de aumento del rendimiento potencial promedio tanto en ambientes favorables como en ambientes marginales, siendo en éstos más rápido ese crecimiento.

A partir de 30 reportes realizados en condiciones de riego o lluvia confiable y 15 conducidos en ambientes más secos (independientes o no del CIMMIYT y publicados de 1976 a 1995) Heisey *et al.* (2002) afirmaron que el promedio de la ganancia en el rendimiento en ambientes con suficiente humedad edáfica fue de alrededor de 1 % al año y la ganancia media en ambientes más secos fue 0.4 % anual.

El progreso del rendimiento es con frecuencia más lento en los ambientes secos que donde hay humedad pues la heredabilidad para el rendimiento es más baja y la interacción genotipo por ambiente es grande lo que hace difícil el progreso en la selección (Munns y Richards, 2007).

Esta aparente contradicción entre los resultados citados tiene su elucidación en que en algunos casos se comparan genotipos desarrollados para condiciones óptimas contra genotipos enfocados para ambientes estresantes siendo ambos grupos sometidos a estrés y siendo el segundo grupo más rendidor. Por otra parte, hay diferencias en las condiciones ambientales que se presentan en cada año de evaluación y entre países, hay diferencias también en el número de años de evaluación, en la época de liberación de los genotipos considerados, y en los genotipos mismos.

### 2.3 Efecto de la sequía en el trigo

Las respuestas de las plantas a la sequía dependen en gran medida de la fase fenológica en la cual se produce (Golberg *et al.*, 1989) y el grado de recuperación también depende de la especie, la edad, el grado de estrés aplicado (Frank *et al.*, 1973), y la variedad.

Moreno y Álvarez (1983) afirmaron que la sequía afecta al trigo en todos sus estados de desarrollo pero el más crítico es el de floración.

Volke y Turrent (1973) estudiaron el efecto de la sequía (aunque no continua) sobre el trigo y encontraron que hubo un “efecto positivo sobre el número de granos por superficie (NES) durante las primeras dos terceras partes del estado de encañado” ya que derivó en un segundo desarrollo de espigas. “Desde el último tercio del estado de encañado hasta al menos la mitad del estado de formación de grano” el NES fue afectado negativamente porque la sequía no permitió el desarrollo completo de espigas. El efecto de la sequía sobre el peso de mil granos estuvo más asociado con el NES que con el número de granos por espiga. La producción de paja (tallos, glumas, y hojas) fue más afectada alrededor del estado de floración, y la altura de la planta alrededor de la iniciación del estado de espigamiento.

Hochman (1982) impuso severos déficits de humedad edáfica a plantas de trigo harinero variedad ‘Lachish’ en tres etapas ontogénicas: el estrés, de amacollamiento a antesis, redujo el índice de área foliar, el número de granos, y el rendimiento en 28 %; el estrés, desde el estado de bota hasta el llenado de grano, redujo el número de granos, el peso de mil granos, y el rendimiento en 36 %; el estrés durante el llenado de grano

redujo el peso de mil granos y el rendimiento en 16 %. El índice de cosecha no fue afectado por la sequía en ninguna etapa.

Por su parte, Blum y Ebercon (1981) encontraron que la tolerancia a la sequía, medida a través de la estabilidad de la membrana celular, disminuye con la edad de la planta. Además, muestran evidencia de un ajuste de la membrana celular al estrés por sequía cuando previamente se han sometido las plantas a un período de sequía. Las variedades de trigo difieren en ese ajuste, por ejemplo 'Pavón 76' resultó con 0 % daño y 'Banaquit S' con 74.3 % al someter sus tejidos a 40 % de polietilenglicol.

Fischer y Maurer (1978) establecieron plantas de trigo harinero altas y enanas, de trigo duro, de triticale, y de cebada y observaron que el rendimiento de grano fue reducido de 37 a 86 % respecto de los controles al cortar el riego desde 69 días antes de anthesis hasta 10 días antes. Los trigos altos y las cebadas fueron más resistentes a la sequía, los trigos enanos resultaron medianamente resistentes, y los triticales y trigos duros fueron los susceptibles. A partir de este estudio tomando en cuenta el experimento 3 en que las plantas fueron sometidas a tres tratamientos de sequía a diferente intensidad, Fischer y Wood (1979) concluyeron que el mayor rendimiento bajo sequía está asociado cercanamente con un mayor peso seco total a la madurez y que los caracteres asociados con las relaciones hídricas en la planta (potencial hídrico, permeabilidad foliar, potencial osmótico foliar, presión de turgencia) tuvieron sólo una menor influencia. Por el contrario, Gupta *et al.* (2000) reportaron una correlación positiva y altamente significativa entre el rendimiento de grano y el biológico con el potencial hídrico y el potencial osmótico al aplicar sequía en el estado de bota y en anthesis. El potencial de turgencia sólo estuvo relacionado con el rendimiento de grano en ambas etapas fenológicas. Además

reportaron que el peso seco de tallos, número de granos, peso hectolítrico, rendimiento de grano, rendimiento biológico, e índice de cosecha disminuyó mucho más cuando el estrés por sequía fue impuesto en la etapa de antesis, mientras que el déficit hídrico en la etapa de bota causó una mayor reducción de la altura de planta y el número de macollos. Observaron también que las plantas estresadas presentaron una mayor resistencia difusiva foliar y menor transpiración.

A fin de prestar atención a los cambios en el potencial hídrico, la fotosíntesis, y la resistencia estomática, Frank *et al.* (1973) sometieron a plantas de trigo harinero a 10, 18 y 27 °C bajo riego o bajo sequía en las etapas de amacollamiento, espigamiento, y llenado de grano. Durante el estrés en la fase de amacollamiento a cualquiera de las tres temperaturas hubo una disminución similar en la fotosíntesis y el potencial hídrico estando inversamente relacionados con la resistencia estomática. El gran cambio en fotosíntesis no correspondió con el pequeño cambio en la resistencia estomática lo que sugirió que otros factores además de la resistencia estomática afectan la fotosíntesis. El estrés se produjo mucho más rápido en la hoja bandera en fase de espigamiento que en la quinta hoja en amacollamiento. La fotosíntesis disminuyó rápidamente hasta que los estomas se cerraron a -16 y -18 bares. El potencial hídrico también disminuyó pero no tan rápido como la fotosíntesis. Los cambios observados en espigamiento fueron similares a los cambios en el periodo de llenado de grano pero la recuperación fue más lenta que en amacollamiento o espigamiento.

Shimishi *et al.* (1982) compararon bajo sequía a un trigo harinero con tres especies silvestres relacionadas y encontraron que el trigo harinero presentó menos capacidad

para mantener alto el potencial hídrico conforme el suelo se secaba, no pudo mantener los estomas abiertos ni tampoco una alta la tasa de fijación de CO<sub>2</sub>.

De acuerdo con Blum *et al.* (1982), temperaturas del dosel más bajas son indicio de potenciales hídricos más altos. Esta relación se vuelve más significativa al aumentar el estrés por sequía. La cercana asociación entre la temperatura de la hoja y el estrés hídrico de la planta es resultado de la reducción del enfriamiento transpiratorio de la hoja debido a que los estomas están cerrados a bajo potencial hídrico.

El estrés hídrico se manifiesta cuando el agua absorbida que depende de las cualidades de las raíces y de las propiedades físicas y químicas del suelo, es menor que el agua evapotranspirada que está en función sobre todo de la radiación neta y el déficit de presión de vapor así como de la conductancia estomática (Acevedo *et al.*, 2002).

Aggarwal y Sinha (1984) estudiaron el comportamiento de 17 variedades de trigo harinero, duro y triticales durante 5 años en diferentes niveles de disponibilidad del agua. Ellos afirmaron que la proporción de agua usada en post-antesis fue importante para las plantas con riego mientras que para las plantas sin riego fue importante la proporción de agua usada en pre y post-antesis. El rendimiento de grano y el índice de cosecha aumentaron con el aumento de la evapotranspiración hasta cierto nivel. Los investigadores clasificaron con base a un índice de susceptibilidad a sequía y a su rendimiento a esas mismas variedades (1987). El grupo de variedades con bajo índice de susceptibilidad a sequía (resistentes a sequía) y moderado rendimiento aumentaron el número de granos por espiga, en ambientes secos, que se ajustó parcialmente con una reducción en el número de espigas por metro cuadrado. Las variedades con alto

rendimiento y resistentes a sequía en ambientes irrigados y bajo sequía moderada tuvieron más espigas y más granos por espiga. El grupo con alto rendimiento y alto índice de susceptibilidad presentaron más granos por espiga pero menos espigas. Las variedades de menor rendimiento y susceptibles a sequía presentaron el menor número de espigas, número de granos por espiga, y materia seca total. La materia seca total y el número de granos por metro cuadrado estuvieron siempre y positivamente correlacionados con el rendimiento de grano.

Doyle y Fischer (1979) estudiaron el comportamiento del trigo harinero 'Timgalen' respecto a su eficiencia en el uso de agua. El trigo fue sembrado en un lugar seco durante tres ciclos agrícolas bajo temporal y el estrés por sequía se dio antes de la madurez en los dos últimos años. Los investigadores encontraron que una media del agua disponible en el suelo de 20-26 mm (que representó 16 % de la máxima disponibilidad de agua en el suelo) redujo la relación  $E_v/E_p$  (Evapotranspiración del cultivo/evapotranspiración potencial, relación que está en función del agua disponible en el suelo y la radiación interceptada) no más del 10 % respecto de los cultivos que disponían de 86-90 mm. La relación de la evapotranspiración total y la acumulación de materia seca fue lineal y cercana aunque la pendiente varió de acuerdo a si el año fue seco o húmedo. La eficiencia de la transpiración (que es la relación entre la acumulación de materia seca y la transpiración del cultivo) estuvo inversamente relacionada con la evapotranspiración potencial.

Shah y Paulsen (2005) colocaron plantas de trigo de primavera (una semana después de que estuvieran al 50 % de anthesis) en cámaras de ambiente controlado donde las sometieron a tres diferentes regímenes de temperatura (baja, intermedia, y

alta) con y sin sequía. Ellos encontraron que el estrés por sequía hizo disminuir las tasas fotosintéticas en todos los regímenes de temperatura desde la primera semana y causó senescencia de las hojas aun a temperatura baja. La falta de humedad a temperatura baja e intermedia disminuyó el rendimiento de grano reduciendo el crecimiento en etapas intermedias. El peso máximo de los granos fue reducido por la sequía en etapas tardías bajo los tres regímenes de temperatura, además fue acortado el periodo de llenado de grano a temperatura baja e intermedia.

Esta reducción de la actividad fotosintética y la transpiración se relaciona con el cierre de los estomas (que impide el ingreso de CO<sub>2</sub>) y/o con los daños causados por la sequía al aparato fotosintético (Shimishi *et al.*, 1982; Golberg *et al.*, 1989).

Paknejad *et al.* (2007) midieron la capacidad fotoquímica del fotosistema II a partir de la relación de la fluorescencia variable y la fluorescencia máxima de la clorofila (FV/FM) de tres variedades de trigo harinero bajo siete diferentes regímenes de riego. El contenido de clorofila disminuyó hasta 25 % bajo los déficits de humedad más severos y esta disminución es atribuida a la disminución en el contenido relativo de agua de la hoja bandera. Las medias de FV y FV/FM fueron disminuyendo conforme el contenido de humedad del suelo disminuía, pero FV/FM disminuyó menos comparado con la fluorescencia variable. FV, FM, y FV/FM tuvieron una alta correlación con el rendimiento de grano. Los investigadores sugieren que la sequía puede interrumpir el flujo de electrones en el fotosistema II.

Johnson y Moss (1976) sometieron a dos variedades semi-enanas de trigo harinero a estrés por sequía lo que causó marchitez en el periodo de llenado de grano.

El sitio de la fotosíntesis tendió a cambiar de la lámina foliar a las vainas de la porción superior del tallo, y a las espigas. Las plantas control y las estresadas fueron expuestas a CO<sub>2</sub> a los 12, 16, y 23 días después del espigamiento. En las plantas estresadas el 46 % del carbono translocado desde hojas y vainas fue encontrado en los granos, comparado con un 35 % en las plantas control. Ya en la madurez el porcentaje de carbono presente en el grano de plantas estresadas fue mayor que en las plantas control debido a la acumulación de carbono en segmentos del tallo en las plantas control. El estrés por sequía ocasionó 14 y 20 % de reducción en el peso del grano y en el rendimiento respectivamente.

Aggarwal y Sinha (1984) estimaron la movilización de asimilados de pre-antesis en dos variedades de trigo harinero de primavera cultivadas bajo humedad residual y bajo riego. El potencial hídrico en antesis en el tratamiento sin riego fue 4-5 bares menor que en el tratamiento con riego y fue suficiente para disminuir el área foliar durante post-antesis debido posiblemente a la reducida disponibilidad de asimilados. Los granos en el tratamiento sin riego pararon de crecer después de los 125 días mientras que los granos de plantas regadas continuaron creciendo por otros 15 días, como resultado el peso del grano se redujo. Las plantas estresadas movilizaron más asimilados formados antes de antesis ya que la contribución de los asimilados formados en post-antesis al rendimiento de grano fue disminuido por el estrés. La movilización de aminoácidos fue reducida y acompañada por un aumento en el transporte de carbohidratos debido al estrés.

El estrés aplicado a trigos de invierno durante el desarrollo temprano de la cariósida disminuyó el tamaño del embrión, el número de gránulos tipo A y B

depositados en el endospermo, adicionalmente acortó el período de llenado de grano y de madurez (Jager *et al.*, 2011).

Frederick y Bauer (1999) plantearon que si la deposición de nitrógeno en el grano no se reduce cuando la sequía ocurre en el llenado de grano, una gran proporción del nitrógeno del grano proviene de la re-movilización de nitrógeno, lo cual junto con la pérdida de actividad fotosintética explica parcialmente por qué el estrés durante el llenado de grano acelera la senescencia de las hojas y acorta el periodo de llenado de grano.

Ahmad y Arain (1999) con base en el comportamiento de cuatro variedades bajo sequía, correlacionaron la disminución del peso de grano y el aumento del contenido de proteína y lisina. Dicha relación fue negativa y altamente significativa.

Al disminuir el riego a trigos harineros, Guttieri *et al.* (2005) observaron que la concentración de proteína en el grano se elevó pero se redujo el rendimiento de molienda o de harina. Además, la actividad de la polifenil oxidasa en el grano, que es una característica indeseable en los tallarines asiáticos, aumentó.

En suma, la sequía causa cambios en los procesos fisiológicos (apertura estomática, transpiración y evapotranspiración, potencial hídrico, temperatura del dosel, fijación de CO<sub>2</sub>, fotosíntesis, contenido de clorofila, movilización de asimilados, y otros) los que interrelacionados disminuyen el área foliar, materia seca total, periodo de llenado de grano, el número de granos, el peso 1000 granos, el rendimiento, y la calidad.

#### **2.4 Mejoramiento genético para resistencia a sequía**

De acuerdo con Sojka *et al.* (1981) la resistencia a sequía es mejor definida como la habilidad para minimizar la pérdida de rendimiento en ausencia de la disponibilidad óptima de agua en el suelo.

Para evaluar la resistencia a sequía, Muñoz (1980) planteó el método riego-sequía (Modelo 1) que consiste en “buscar una localidad árida o semirárida con riego” donde los regímenes de sequía varíen según la decisión del experimentador y luego seleccionar los materiales genéticos tomando en cuenta su comportamiento promedio en por lo menos dos condiciones o niveles de humedad (riego y sequía) y con base a su “capacidad de reducir su producción en menor grado al pasar de la condición favorable a la desfavorable”.

La sequía afecta a la planta entera y todos sus procesos fisiológicos y la resistencia a la sequía, por lo tanto, es un carácter cuantitativo y complejo que integra numerosos efectos genéticos muchos de los cuales se expresan bajo sequía y humedad y otros sólo bajo sequía (Muñoz y Rodríguez, 1988).

En el mismo tenor Blum (1983) apuntó que la resistencia a sequía es independiente del rendimiento potencial pues hay variedades de alto rendimiento que conforme la humedad del suelo disminuye su rendimiento se abate; sin embargo pueden mejorarse simultáneamente (Singh *et al.*, 2007) La dificultad radica en las bajas heredabilidades para el rendimiento y sus componentes cuando el rendimiento es reducido por el estrés.

“Las heredabilidades son una función de la variabilidad genética aditiva disponible, y por lo tanto de la expansión en la expresión de los caracteres en los que la selección

toma lugar”. La cerosidad y la producción de prolina, por ejemplo se expresan más diferencialmente en condiciones de estrés por sequía que en condiciones óptimas; entonces es de esperar que sus heredabilidades y respuesta a la selección sean mayores en ambientes marginales (van Ginkel, 1999)

Al respecto, Moreno y Álvarez (1983) y Segovia *et al.* (1991) afirman que los ambientes más eficientes y prácticos para formar e identificar genotipos con tolerancia a sequía es el de humedad restringida y temporal, aunque los factores que contribuyen a altos rendimientos bajo condiciones favorables también pueden contribuir al rendimiento en condiciones menos favorables (Munns y Richards, 2007) por lo que el CIMMYT usa el material genético altamente rendidor (eficiente en utilizar todos los recursos ambientales) derivado de las actividades de mejoramiento en el mega-ambiente óptimo en las cruzas para desarrollar materiales dirigidos a mega-ambientes más estresantes (van Ginkel, 1999).

Dado que los mejoradores no sólo desarrollan variedades para resistencia a sequía, los materiales segregantes además son seleccionados en otros ambientes con el fin de adicionar caracteres de resistencia a enfermedades foliares, royas, tipo agronómico, y alto rendimiento.

Para identificar germoplasma resistente a sequía es necesario tener presentes las respuestas de resistencia a sequía de las plantas. Aquellas que pueden completar su ciclo antes de estar bajo un severo estado de estrés hídrico se dice que escapan a la sequía (May y Milthorpe, 1965). Los caracteres floración temprana y maduración temprana (precocidad) han sido considerados en los programas de mejoramiento en todo

el mundo y conllevan un mayor índice de cosecha y rendimiento (Munns y Richards, 2007). Las plantas evitan la sequía cuando son capaces de reducir al mínimo el contenido de agua de sus tejidos bajo déficit hídrico gracias a un sistema profundo de raíces o a la reducción de la transpiración. Al reducir al mínimo cualquier proceso vital cuando los tejidos están deshidratados, o cuando son capaces de recuperarse al momento en que el agua es reabastecida, las plantas están resistiendo la desecación (May y Milthorpe, 1965; Blum *et al.*, 1982).

Ya que el desempeño de un genotipo bajo estrés es reflejo tanto de su respuesta a la sequía como de su nivel de rendimiento potencial, una alternativa de selección está basada en los atributos fisiológicos de adaptación a sequía en combinación con la selección para alto rendimiento bajo un ambiente estresante (Blum, 1983).

En este sentido Richards *et al.* (2001) afirman que el enfoque fisiológico tiene un potencial mayor para aumentar el rendimiento y su estabilidad que el que pueda alcanzarse con el mejoramiento empírico solamente.

La selección basada en los componentes fisiológicos de resistencia a sequía debería ser realizada sólo si aporta un avance, y los experimentos pueden establecerse sólo cuando hayan sido desarrolladas técnicas adecuadas de evaluación (Blum, 1982).

Para incorporar el criterio fisiológico al mejoramiento Reynolds *et al.* (2001) propusieron dos pasos. El primero es la identificación de caracteres asociados con el desempeño el cual incluye la definición del ambiente objetivo, la elección de los genotipos apropiados para evaluar la expresión del carácter, el diseño del ambiente experimental, el desarrollo de protocolos para optimizar la expresión del carácter, y la

medición de la expresión del carácter y de la asociación con el desempeño. La identificación de los caracteres limitantes del rendimiento y su aplicación en el mejoramiento son grandes retos dados los diferentes tipos de sequía y la variabilidad temporal de la severidad de la sequía, los efectos pleiotrópicos de los caracteres y la necesidad de su evaluación a través de los años (Richards *et al.*, 2001)

Ya desde hace muchos años se han hecho esfuerzos por identificar caracteres relacionados con la resistencia a sequía, por ejemplo, Hurd (1974) obtuvo variedades de alto rendimiento y tolerantes a sequía retrocruzando con una variedad que tenía un sistema de raíces extenso. Hurd proyectó que si las variedades que desarrollan anticipadamente un sistema prolífico de raíces mantuvieran este desarrollo hasta la cosecha podrían hacer uso de más humedad disponible para evitar daños internos. Sin embargo, Hurd reconoció que una raíz extensa es sólo uno de los tantos factores que contribuyen a un alto rendimiento bajo sequía, por lo que sugirió una combinación de dos o más atributos en una misma variedad siendo ésta superior a cualquiera de sus progenitores.

En años más recientes, Dodig *et al.* (2008) encontraron que la biomasa total y el vigor temprano fueron los caracteres importantes en la selección de genotipos en un rango de condiciones estresantes y no estresantes. Además, escogieron tres indicadores a fin de evaluar el rendimiento de 100 variedades y criollos bajo tres regímenes de humedad durante 4 años. Los índices de productividad media y de tolerancia al estrés involucraron el rendimiento bajo riego y el rendimiento bajo estrés, además de estos parámetros el índice de resistencia a sequía involucró los rendimientos medios de todos

los genotipos bajo estrés y bajo sequía. La productividad media fue el índice más adecuado para predecir el desempeño en este experimento.

El segundo paso para incorporar el criterio fisiológico en el mejoramiento es la estimación de la heredabilidad de los caracteres y la respuesta a la selección (Reynolds *et al.*, 2001). El éxito de la selección dependerá de la varianza aditiva genética adecuada y de la heredabilidad en sentido estricto (Reynolds *et al.*, 2012).

Reynolds *et al.* (2011) plantean que para mejorar genéticamente el rendimiento potencial las estrategias de cruzamientos basados en caracteres deben enfocarse en lograr su expresión simultánea en materiales agronómicos de élite. Las cruas interespecíficas de parientes silvestres y las cruas con criollos provenientes de ambientes estresantes pueden conferir genes para adaptación a sequía como los genes que provean una mayor habilidad para extraer agua del suelo (Reynolds *et al.*, 2007) o aumento de biomasa (Foulkes *et al.*, 2007).

## **2.5 Justificación del mejoramiento genético para zonas de temporal y riego limitado**

Desde mucho tiempo atrás el mejoramiento genético para sequía ha sido importante en áreas semi-desérticas o áridas. Ahora, sumar la resistencia a sequía a los atributos de las variedades es imprescindible también en las áreas de riego y buen temporal debido al cambio climático global, regional, y de sitio, a la contaminación de los cuerpos de agua, y a su sobreexplotación.

La Comisión Nacional del Agua (2015) distingue dos tipos de sequía. La sequía meteorológica definida “como una función del déficit de precipitación, expresado en porcentaje respecto de la pluviosidad media anual o estacional de largo periodo, y su duración en una determinada región” (Hernández, 1995). Ligada a la sequía meteorológica está la sequía hidrológica que “se refiere a las deficiencias en las disponibilidades de agua de superficie como subterránea. Ésta es medida como los escurrimientos y los niveles de lagos, embalses, y los niveles en acuíferos” (Comisión Nacional del Agua, 2015).

### **2.5.1 Efecto del cambio climático en la precipitación y en el trigo**

Nelson *et al.* (2009) para simular el clima del futuro utilizando el escenario A2 (nivel de emisiones de moderadas a altas) del IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) usaron el modelo del NCAR (Centro Nacional de los Estados Unidos para la Investigación Atmosférica) y el modelo del CSIRO (Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad Británica). Los investigadores afirman que ambos modelos predicen mayores precipitaciones que sin cambio climático a nivel mundial. Sin embargo, en el caso de trigo bajo riego, los dos modelos indican reducciones hasta de 34.3 % en el rendimiento debido al aumento de las temperaturas inducidas por el cambio climático. Basta el aumento 1 °C de la temperatura durante la estación de crecimiento del trigo para que el rendimiento disminuya del 3 al 10 % (You *et al.*, 2009). Bajo temporal o seco es previsto que el trigo tenga disminuciones pequeñas en el rendimiento si no es fertilizado pero si lo es, incluso puede tener aumentos en el rendimiento de hasta 9 %. El aumento de temperaturas causará un incremento de los requerimientos hídricos de los cultivos (Nelson *et al.*, 2009).

Los aspectos más importantes del cambio climático que impactan la producción del trigo son el aumento de las temperaturas y la concentración de CO<sub>2</sub> asociados con alteraciones de los patrones de precipitación. También es de esperar un impacto indirecto debido a la proliferación o disminución de plagas y enfermedades (Hodson y White, 2009).

En México, las tendencias de precipitación de 1920 a 2004 indican que ha habido un aumento de lluvia durante el verano de 1.8 % al noreste de México y costas del Pacífico Centro-Sur. La disminución de la precipitación es observada al centro y especialmente en la región más lluviosa del país con un cambio de 1.2 % en la precipitación anual (Méndez *et al.*, 2008).

Con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de México ante la sequía en el momento actual y ante un cambio climático, Hernández *et al.* (1995) estimaron un índice de severidad actual y de dos escenarios resultado de dos modelos basados en que el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se duplicará entre los años 2025 y 2050. Las áreas más afectadas por el aumento de la severidad de la sequía meteorológica están localizadas en el centro y sur que sumadas abarcarán 36.4 % del territorio. El 29.2 % de la superficie designada con un índice muy severo pasará a severo e incluye áreas de Baja California, Sonora, y Coahuila. La superficie designada como fuerte pasaría a muy fuerte en 73.3 % y corresponde a Veracruz, Puebla, Morelos, Estado de México, y Tlaxcala. Las áreas designadas con un índice leve pasarán a muy fuerte en 22.8 % de su extensión y están localizadas en la zona de El Bajío y en los estados de Jalisco, Michoacán, Puebla, y Guerrero.

Según Magaña *et al.* (2004) es casi seguro que las temperaturas en el país aumentarán pero la precipitación es más difícil de pronosticar. Sin embargo, afirmaron que hay una tendencia futura a la ocurrencia de mayor precipitación en la mayor parte de México, sobre todo en los estados del norte. A pesar de que aumenten las lluvias, la humedad en el suelo podría disminuir como resultado de mayor temperatura y evaporación. En los estados donde las lluvias dependen de lo que pasa en el Pacífico mexicano la tendencia indica menores precipitaciones.

Considerando Modelos de Circulación Global y proyecciones de dispersión en temperatura y precipitación, en México se espera una disminución de las lluvias de invierno que fluctúa entre 0 y 0.6 mm al día lo que representa una reducción de hasta 15 % en regiones del centro y menor a 5 % en la costa del Golfo de México. Cabe mencionar que hay incertidumbre sobre las proyecciones por la dispersión entre los modelos. Es posible que los “nortes” sean menos frecuentes pero es incierto el grado de disminución. Habrá un aumento de la intensidad de los huracanes que propiciará un aumento de la precipitación del 18 %, aun así las observaciones de los últimos años indican que los periodos de sequía serán más prolongados y más severos (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2015) a través de su página de internet presenta los escenarios futuros por estado en temperatura media anual (TMA) y precipitación total anual (PTA) bajo el escenario de emisiones altas (A2). En el caso de los estados productores de trigo Sonora, Estado de México, y Guanajuato los datos son los siguientes:

**Cuadro 1. Cambios futuros en la temperatura media anual y precipitación total anual en los estados seleccionados.**

Año Estado	2020		2050		2080	
	PTA (%)	TMA (°C)	PTA (%)	TMA (°C)	PTA (%)	TMA (°C)
Guanajuato	-5 y -10	+0.5 y +1.4	+5 y -15	+1.5 y +2.5	+5 y -20	+3 y +4
Edo.						
México	-5 y -10	+1.8 y +1.2	-5 y -10	+1.0 y +2.0	-5 y -20	+2 y +4
Sonora	0 y -10	+1.0 y +2.0	+5 y -10	+1.5 y +3	+5 y -15	+3 y +5

PTA= precipitación total anual, TMA=temperatura media anual.

En los Valles del Yaqui (Sonora) y de San Luis Río Colorado (Baja California), regiones donde es producida la mayor cantidad de trigo duro y trigo harinero respectivamente, Lobell *et al.* (2005) detectaron, con base a un análisis de simulación CERES, la disminución de las temperaturas mínimas en el periodo de 1982 a 2002 y estimaron que el impacto de mejores condiciones del clima en el aumento del rendimiento fue de  $25.5 \pm 10.1$  % en la primer región y de  $22.0 \pm 12.4$  % en la segunda. De ahí que los investigadores concluyen que las ganancias en rendimiento debidas al mejoramiento genético y al manejo probablemente han sido sobreestimadas.

En la región Ciénega de Chapala, donde es sembrado trigo en enero, durante 1961 a 2006 no ha habido un cambio significativo de la tendencia en la precipitación anual pero la temperatura máxima anual ha seguido una tendencia al incremento a partir de 1992. Hacia el año 2090 la tendencia es hacia el incremento de las temperaturas sobre todo de la temperatura máxima y una ligera disminución en la precipitación. Como resultado, el ciclo del trigo de invierno se acortará 16 días en la etapa de siembra-floración y 4 días en la de floración-madurez fisiológica. Puesto que durante todo el ciclo se presentarían temperaturas máximas mayores a 25 °C, este cultivo ya no sería apropiado para la región (Zarazúa, 2011).

Las tendencias actuales y las proyecciones a futuro son más útiles a nivel regional pero en el caso de México donde las variaciones que dan por resultado el clima se hacen casi infinitas es todavía más útil trabajar a nivel de nicho agroecológico y con temperaturas no medias sino máximas y mínimas (Comunicación personal, Dr. Abel Muñoz, Febrero 2015).

Con el fin de manejar la variabilidad del cambio climático y para adaptarse a éste serán necesarias variedades con una aumentada resistencia a sequía y al calor, así como a plagas y enfermedades. En zonas que se vuelvan cada vez más áridas, el trigo puede llegar a ser más competitivo que otros cultivos como el maíz porque ha habido un progreso genético consistente del trigo bajo sequía gracias a la investigación para obtener materiales de maduración temprana, o cuyas fases fenológicas críticas no coinciden con condiciones estresantes, o que tienen un buen sistema de raíces (Hellin *et al.*, 2012).

### **2.5.2 Situación del abastecimiento del agua en las principales zonas trigueras del país**

El agua de riego proviene de dos fuentes: el agua superficial que corresponde al agua almacenada en las presas y el agua del subsuelo obtenida mediante bombeo.

De cada 100 litros de agua usados en México, 76 son destinados a la agricultura y de esos 76 litros el 35 % es de origen subterráneo (CONAGUA, 2014).

De acuerdo con Mendoza *et al.* (2004), en México el déficit de almacenamiento en presas es de 101,044.6 millones de metros cúbicos en el clima actual, lo que representa

24.6 % de la escorrentía anual. Con base a tres escenarios de cambio climático para el año 2050, el déficit de almacenamiento de agua podría elevarse a más del doble o a reducirse a la mitad del valor actual.

Tomando en cuenta los escenarios del clima para el año 2020, se estima que la disponibilidad del agua disminuirá en 10 % respecto al año 2000, debido al aumento de la temperatura, la evapotranspiración, y a una ligera disminución de la precipitación. La demanda de agua del sector agrícola se calcula que aumentará 10 % ya que por la disminución en la humedad del suelo será necesario extraer más agua para riego (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Según la actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en México (CONAGUA, 2015b), el déficit de los acuíferos ubicados en las principales zonas trigueras están presentes en el Cuadro 2.

El agua empleada en usos consuntivos (extractivos o en los que existe pérdida volumétrica de agua) respecto a su disponibilidad es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2013).

**Cuadro 2. Acuíferos ubicados en las principales zonas trigueras y su disponibilidad de agua.**

Región hidrológico-administrativa	Estado	Acuífero	Déficit en millones de metros cúbicos	
Noroeste	Sonora	Valle del Yaqui	0.24	
		Cumuripa	0.00	
		Bavispe	0.00	
		Moctezuma	0.00	
		Cocoraque	0.00	
		Valle de Guaymas	9.65	
		San José de Guaymas	13.92	
		Río Chico	0.00	
		Fuerte-Mayo	0.00	
		Península de Baja California	Valle de San Luis Río Colorado	7.53
Baja California	Valle de Mexicali		456.04	
Pacífico Norte	Baja California Sur	Santo Domingo	0.00	
	Sinaloa	Río Sinaloa	0.00	
Río Bravo	Zacatecas	Hidalgo	0.00	
	Chihuahua	Flores-Magón-Villa Ahumada	110.38	
Lerma-Santiago-Pacífico	Nuevo León	Citrícola Norte	119.50	
		Guanajuato	Valle de Celaya	136.86
			Irapuato-Valle	163.28
	Pénjamo-Abasolo		125.51	
	Jalisco	La Barca	39.17	
		Poncitlán	5.01	
	Michoacán	Ciénega de Chapala	0.00	
Pastor Ortiz- La Piedad		68.98		
Aguas del Valle de México	Estado de México	Chalco-Amecameca	21.62	

El Cuadro 3 muestra el grado de presión sobre el agua por región hidrológico-administrativa (RHA).

En la RHA Noroeste la escasez del agua superficial ha causado la explotación del agua subterránea con la que son proveídas las actividades agrícolas. La problemática

con relación al sector agrícola en esta región es la sobreexplotación de sus cuencas y acuíferos y la contaminación de cauces y cuerpos de agua (CONAGUA, 2012b).

**Cuadro 3. Grado de presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2013) en las regiones hidrológico-administrativas donde se localizan zonas productoras de trigo.**

<b>Región hidrológico administrativa</b>	<b>Grado de presión (%)</b>	<b>Clasificación del grado de presión</b>
Noroeste	83.9	Alto
Península de Baja California	77.9	Alto
Pacífico Norte	40.3	Alto
Río Bravo	73.7	Alto
Lerma-Santiago-Pacífico	42.1	Alto
Aguas del Valle de México	136.1	Muy alto

En la RHA Noroeste la escasez del agua superficial ha causado la explotación del agua subterránea con la que son proveídas las actividades agrícolas. La problemática con relación al sector agrícola en esta región es la sobreexplotación de sus cuencas y acuíferos y la contaminación de cauces y cuerpos de agua (CONAGUA, 2012b).

En la RHA Península de Baja California la cantidad máxima que es posible explotar anualmente es 4707 hm<sup>3</sup>, de los cuales 28 % es de procedencia subterránea y el restante 72 % es de aguas superficiales que en su mayor parte corresponden a los 1850 hm<sup>3</sup> del Río Colorado. Para satisfacer la demanda de agua del sector agropecuario es sobreexplotado un volumen cercano a los 300 hm<sup>3</sup>. El mayor volumen de sobreexplotación está concentrado en San Luis Río Colorado, Sonora (CONAGUA, 2012a).

Los volúmenes de escurrimiento superficial y las obras de almacenamiento no han sido suficientes en la región Pacífico Norte por lo que se ha recurrido a la explotación del agua subterránea. A diferencia de las otras regiones en las que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, en esta región el 50 % del agua es destinada a la generación de energía hidroeléctrica. Entre los principales problemas en esta región están la sobreexplotación de los acuíferos, períodos recurrentes y prolongados de sequía, y deficiente manejo y uso del agua en la agricultura. (CONAGUA, 2012c).

La RHA Río Bravo está catalogada como deficitaria de aguas superficiales, añadiendo a su problemática hídrica la sobreexplotación de sus cuencas y acuíferos, sequías recurrentes, y el uso ineficiente del agua en los distritos y unidades de riego (CONAGUA, 2012d).

La demanda anual de agua en la región Lerma-Santiago-Pacífico es de 15800 hm<sup>3</sup>. El 15 % de esta demanda es satisfecha a través de oferta no sustentable (acuíferos sobreexplotados y gasto ecológico). La diferencia entre la oferta sustentable por capacidad instalada y la demanda total, es decir, la brecha total para el 2030 se estima en 4600 hm<sup>3</sup> (CONAGUA, 2010). El sector agrícola tiene la mayor demanda hídrica satisfaciéndola con 57 % de aguas superficiales y 43 % de aguas subterráneas. La sobreexplotación de las fuentes subterráneas es debida a “las sobre-concesiones para su aprovechamiento y a las excesivas extracciones sin control” por parte de las hectáreas de pequeña irrigación (URDERALES), se plantea entonces la reducción en el consumo en el uso agrícola por lo menos en la subregión Lerma (CONAGUA, 2006).

La región que presenta los mayores problemas hídricos es la de Aguas del Valle de México puesto que concentra el 20 % de la población y su crecimiento acelerado en tan solo 1 % del territorio, lo que ha ocasionado la disminución de la recarga de los acuíferos por sobreexplotación y con ello la desaparición de manantiales, lagos, y humedales (CONAGUA, 2012e).

En las regiones Noroeste, Península de Baja California, y Pacífico Norte, la suma de la oferta de agua superficial y la de agua subterránea ni siquiera alcanza para cubrir la demanda actual del sector agrícola (Cuadro 4). Para el año 2030 está previsto que la brecha de los sectores usuarios del agua aumente a menos que la sociedad y el gobierno emprendan juntos acciones ahora. En el caso de la región Aguas del Valle de México el mayor consumo es y será el del sector público urbano, doméstico, y de servicios mientras que la demanda del sector agrícola disminuirá debido posiblemente a que la mancha urbana seguirá extendiéndose hacia terrenos agrícolas (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Oferta de agua superficial y subterránea, y demanda de agua del sector agropecuario en la actualidad y hacia el 2030 en cada región hidrológico-administrativa (en miles de hectómetros cúbicos).**

Región hidrológico-administrativa	Actual			2030			Brecha agrícola
	Oferta superficial	Oferta subterránea	Demanda	Oferta superficial	Oferta subterránea	Demanda	
Noroeste	2.7	2.3	5.4	2.7	2.6	5.9	0.31
Península de Baja California	1.8	1.1	3.1	1.91	1.5	3.46	0.40
Pacífico Norte	9.8	0.8	11.4	10.2	0.8	13.1	1.40
Río Bravo	4.1	3.6	7.3	4.3	3.6	8.9	1.60
Lerma-Santiago-Pacífico	7.3	6.1	13.1	7.8	6.1	14.6	0.70
Aguas del Valle de México	2.0	1.3	2.0	2.1	1.3	1.8	

Fuente: CONAGUA, 2010 y 2012a, b, c, d, e.

## 2.6 Importancia del trigo en México

En el año 2014 México produjo 3, 490,457.73 toneladas de trigo, de las cuales el 98.2 % fue destinado a consumo humano, 1.5 % a consumo animal, y el resto fue utilizado como semilla (SIAP, 2015). De la producción de trigo para grano, 59.6 % correspondió a trigo duro o cristalino y el resto a trigo harinero (SIAP, 2015). Por un lado México tiene un excedente de casi dos millones de toneladas de trigo cristalino, parte del cual es exportado a África; por otro lado es deficitario en trigo harinero y tiene que importarse (Martínez, 2014).

En México el trigo es el segundo grano más consumido después del maíz (SAGARPA, Comité Nacional Sistema-Producto, FIRCO, COLPOS, 2010) y su demanda aumentará constantemente en los próximos veinte años debido al crecimiento poblacional, al mayor consumo per cápita de trigo y de proteína animal, de manera que de no hacer mejoras en la producción, los mexicanos podrían depender de hasta un 75 % de las importaciones para satisfacer sus necesidades (CANIMOLT, 2012).

En 2013 México importó el 55.2 % de su consumo (CANIMOLT, 2014) y en 2014 el valor de las importaciones de trigo fue de 1335 millones de dólares mientras que las exportaciones tuvieron un valor de 404 millones de dólares (Banco de México, 2015).

El aumento de las importaciones de trigo harinero es atribuible a la falta de dotación de agua que provoca la reducción de la superficie sembrada, factores climáticos adversos, y a la renuencia de los productores a adoptar variedades que necesita la industria molinera (CANIMOLT, 2015).

Sonora, Baja California, y Chihuahua son los tres principales productores de trigo, su agricultura está basada en el riego y por ello su rendimiento es 4.9 toneladas mayor que bajo temporal (SIAP, 2014)

El presidente ejecutivo de la Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo, José Luis Fuente Pochat (2015), afirmó que es indispensable que los investigadores desarrollen variedades para temporal que sean más resistentes a los cambios climáticos o que sean de ciclo más corto, y con calidad molinera.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Diseño de la investigación

La investigación se estableció bajo el diseño experimental en bloques al azar en parcelas subdivididas con cuatro factores y dos repeticiones. Los factores y sus niveles fueron localidades: Celaya, Guanajuato y Montecillo, Estado de México; fechas de siembra: una óptima y otra tardía en cada localidad (Cuadro 5); niveles de riego: normal y limitado en cada fecha de siembra; genotipos: dieciséis variedades de trigo harinero. La unidad experimental consistió de cuatro surcos de 2 m de longitud separados a 0.3 m y la parcela útil fue el total de la unidad experimental (2.4 m<sup>2</sup>).

**Cuadro 5. Fechas de siembra en las dos localidades.**

LOC*FS	Localidad	Fecha de siembra
LOC1*FS1	Celaya	18 diciembre 2014
LOC1*FS2	Montecillo	22 diciembre 2014
LOC2*FS1	Celaya	7 enero 2015
LOC2*FS2	Montecillo	8 enero 2015

#### 3.2 Localidades

La investigación fue realizada en el ciclo invierno-primavera 2014-2015 en el Campo Experimental Bajío del INIFAP en Celaya Guanajuato (20° 53' Norte, 100° 80' Oeste, 1765 msnm, clima semicálido semiseco, y precipitación media anual de 601 mm) y en el Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México (19° 21' Norte, 98°

53' Oeste, 2250 msnm, clima templado semiseco, y precipitación media anual de 618.5 mm).

Los datos atmosféricos correspondientes a la estación de crecimiento del cultivo fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas de Fundación Celaya, Guanajuato (INIFAP) y de Chapingo (Universidad Autónoma Chapingo).

### **3.3 Material Genético**

Fueron utilizados dieciséis genotipos de trigo harinero pertenecientes a la Colección de Variedades Liberadas en México hasta 2015 que consta de 213 trigos harineros, 19 trigos duros y 4 triticales (Suaste *et al.*, 2015) y es mantenida por ICAMEX-INIFAP. Los genotipos evaluados, dos por cada era desde 1940 a 2015, fueron elegidos con base al éxito y superficie sembrada que en su momento tuvieron. Cada era abarca 10 años y representa los objetivos, estrategias y métodos de mejoramiento aplicados en esos 10 años. En el Cuadro 6 están los nombres de las variedades, la era a la que corresponden, así como la condición para la cual fueron desarrolladas.

**Cuadro 6. Genotipos utilizados en la investigación.**

<b>Genotipo</b>	<b>Década o Era</b>	<b>Eras</b>	<b>Año de liberación</b>	<b>Condición</b>
Kentana 48	1941-1950	1	1948	Riego
Chapingo 48			1948	Riego
Yaktana 54C	1951-1960	2	1954	Riego
Lerma Rojo			1955	Riego
Lerma Rojo S64	1961-1970	3	1964	Riego
Siete Cerros			1966	Riego
Salamanca S75	1971-1980	4	1975	Riego
Pavón F76			1976	Riego
Seri M82	1981-1990	5	1982	Riego
Temporalera M87			1987	Temporal
Baviacora M92	1991-2000	6	1992	Riego
Cortázar S94			1994	Riego
Roelfs F2007	2001-2010	7	2007	Riego
Nana F2007			2007	Temporal
Bacorehuis F2015	2011-2020	8	2015	Riego
Borlaug 100 F2014			2014	Riego

### **3.4 Análisis de suelo y determinación de las constantes de humedad**

En cada sitio y dada la uniformidad y tamaño pequeño del terreno donde se sembraron los cuatro experimentos, tres submuestras de suelo fueron tomadas a una profundidad de 0 a 30 cm para formar una muestra compuesta por cada localidad que se analizó una parte, en el laboratorio de Nutrición Vegetal y la otra en el laboratorio de Física de Suelos, ambos del Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

Los métodos de análisis físicos y químicos están presentados en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Propiedades del suelo y métodos para su análisis.**

<b>Propiedades del suelo</b>	<b>Método</b>
Reacción del suelo (pH)	En agua relación 1:2
Conductividad eléctrica (CE)	En extracto de pasta de saturación con puente de conductividad
Nitrógeno total (Nt)	Kjeldahl
Fósforo (P)	Olsen
Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (MG), Sodio (Na) intercambiables	Acetato de amonio
Textura	Bouyoucos
Capacidad de campo (CC)	Olla de presión (-0.3 bar)
Punto de marchitez permanente (PMP)	Membrana de presión (-15 bar)

### **3.5 Manejo experimental**

La densidad fue de 100 kg ha<sup>-1</sup>. La fertilización se aplicó al voleo al momento de la siembra para las fechas de siembra de Montecillo a una dosis de 80-40-00 con urea y superfosfato de calcio triple. Para las fechas de siembra de Celaya la dosis fue 120-60-00, luego antes el segundo riego una dosis de 120-00-00 fue empleada para las fechas de siembra de Celaya y las de Montecillo ya no recibieron fertilización al suelo.

En Montecillo los días 4 y 25 de febrero fue asperjado fertilizante foliar a una dosis de 4 L ha<sup>-1</sup> de Nutriplant-Plus® y 2 L ha<sup>-1</sup> de Nutri-Humus® con el fin de mitigar el daño por las heladas. Las malezas, insectos, y hongos fueron controlados con agroquímicos. En Montecillo el control de maleza fue principalmente manual y dado que en esta localidad las plantas bajo riego normal crecieron más altas y hubo varias tormentas con

fueres vientos, fueron colocados tutores y alambre para evitar el acame. El ataque de pájaros en Celaya fue controlado con personal del INIFAP como pajareros. En Montecillo fue colocada una malla antipájaros.

Los dos niveles de riego fueron riego normal (RN) y riego limitado (RL). El riego normal consistió para las fechas de siembra de Celaya en cuatro riegos distribuidos a los 0, 45, 80 y 110 días después de la siembra (dds), mientras que el riego limitado consistió en tres riegos aplicados a los 0, 45 y 80 dds en la primera fecha de siembra y en dos riegos aplicados a los 0 y 50 dds en la segunda fecha de siembra; es decir, la sequía fue terminal. En Montecillo para la primera fecha de siembra fueron aplicados 8 riegos en riego normal distribuidos a los 0, 7, 15, 24, 49, 74, 108 y 129 dds, el tratamiento de riego limitado consistió en aplicar riego a los 0, 7, 15 y 24 dds. Para la segunda fecha el riego normal recibió 7 riegos repartidos a los 0, 8, 20, 32, 57, 89 y 110 dds en riego normal y en riego limitado fueron aplicados sólo los primeros cuatro a esos mismos intervalos.

El contenido de humedad edáfica actual fue determinado con el método gravimétrico muestreando el suelo con una barrena Veihmeyer considerando 4 submuestras por cada nivel de riego y repetición. Las muestras de suelo fueron secadas a peso constante y la humedad fue calculada con la fórmula siguiente:

$$\% \text{ de humedad} = ((\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}) / \text{Peso suelo seco}) * 100$$

En Celaya el muestreo fue realizado cada 10 días a una profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm. En Montecillo los datos fueron obtenidos cada 7 días a una profundidad de 0-10 cm y 10-30 cm.

### **3.6 Registro de las variables en estudio**

1. Días a espigamiento (DE): días transcurridos desde la siembra a la fecha en que el 50 % de las espigas estuvieron arriba de la aurícula de la hoja bandera.
2. Días a madurez (DM) o madurez fisiológica: días transcurridos desde la siembra a la fecha en que el pedúnculo de la espiga adquirió un color amarillo.
3. Altura de planta (AP): altura medida en centímetros desde la superficie del suelo hasta la espiguilla terminal de la espiga (sin considerar aristas) de cuatro plantas de cada unidad experimental.
4. Contenido de clorofila (CL): medición de la absorbancia de la hoja de cuatro plantas de los surcos centrales en dos regiones de longitud de onda con un SPAD 502 (Konica Minolta, Spectrum Technologies Inc.). Esta variable fue registrada una vez antes de floración y otra en el periodo de llenado de grano. En la primera fecha de siembra en Montecillo la segunda lectura fue tomada en floración.
5. Temperatura del dosel (TD): medición de la temperatura del dosel en °C desde las cuatro esquinas de cada unidad experimental con un termómetro infrarrojo (Spectrum Technologies Inc.) en la etapa de floración para la primera fecha de siembra en Montecillo y en el periodo de llenado de grano para el resto de las fechas de siembra.
6. Longitud de espiga (LE): longitud en centímetros desde la base de 10 espigas hasta la punta de su espiguilla terminal (sin considerar aristas).
7. Espiguillas por espiga (NEE): número de espiguillas de las mismas 10 espigas de cada unidad experimental.

8. Peso de mil granos (PMG): peso de tres muestras de 200 granos tomados al azar, registrados en gramos con una balanza Scout Ohaus y multiplicado por 5.
9. Peso hectolítrico (PHL): medición de una muestra de granos con un equipo Mini Gac Plus (Dickey-John) registrado en kg hL<sup>-1</sup>.
10. Índice de cosecha (IC): determinado en una muestra de 25 tallos cortados al ras del suelo a lo largo de los dos surcos centrales de cada unidad experimental. Los tallos fueron puestos a secar en un invernadero durante 4 días y fueron pesados (RB), luego las espigas fueron cortadas y trilladas para pesar el grano (RE). El IC fue calculado con la expresión:  $IC=RE/RB$ .
11. Biomasa aérea (BIO): calculada con la ecuación  $BIO= (RG + 25 RE/PU)/IC$  donde PU es la parcela útil en metros cuadrados. Registrada en g m<sup>-2</sup>.
12. Rendimiento de grano (RG): peso en gramos de los granos obtenidos de los cuatro surcos. RG fue transformada a kg ha<sup>-1</sup>.
13. Espigas por metro cuadrado (EMPC): calculada con la ecuación  $EMPC=BIO/RB$ .
14. Granos por metro cuadrado (GPMC): calculada con la ecuación  $GPMC=(RG/PMG)*100$ .
15. Tasa de llenado de grano (TLLG): calculada como sigue  $TLLG=RG / (DM-DE)$  expresada en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

Adicionalmente fueron calculadas las unidades calor por genotipo con base en los datos de temperatura media conforme a la siguiente fórmula  $UC= \Sigma (Tm- Tb)$ , donde UC= unidades calor,  $\Sigma$ = sumatoria de la diferencia de la temperatura media y temperatura

base desde la fecha de siembra hasta la madurez,  $T_m$ = temperatura media diaria,  $T_b$ =temperatura base de 4.5 °C (Ortiz-Monasterio *et al.*, 1994). Así mismo, fueron calculadas las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas de las primeras y segundas fechas de siembra.

### 3.7 Análisis estadístico

Los datos obtenidos para todas las variables descritas fueron analizados utilizando el programa SAS (Statistical Analysis System para Windows versión 9.0). Fueron desarrollados varios modelos de análisis. Un primer análisis por cada fecha de siembra fue el de bloques completamente al azar en parcelas divididas con el modelo:

$$1. Y_{ijk} = R_i + NR_j + (R*NR)_{ij} + G_k + (NR *G)_{jk} + E_{ijk}$$

Donde:  $R_j$  es el efecto de repeticiones. La hipótesis de la influencia del nivel de riego ( $NR_j$ ) se probó con el error  $(R*NR)_{ij}$  atribuible a la parcela grande, y los genotipos ( $G_k$ ) y la interacción  $(NR *G)_{jk}$  con el residual  $E_{ijk}$ .

Posteriormente fueron analizados los datos comparando las fechas de siembra (FS), niveles de riego (NR) y genotipos por cada localidad (ignorando  $FS*NR$  y  $FS*NR*G$  que se mandaron al residual) con el modelo:

$$2. Y_{ijkn} = FS_n + R_i + NR_j + G_k + (G*FS)_{kn} + (G*NR)_{jk} + E_{ijkn}$$

Para probar el efecto de las localidades (LOC) mediante el análisis de varianza fue aplicado el modelo de un factorial  $LOC*NR*G$  (ignorando FS):

$$3. Y_{ijkm} = LOC_m + R_i + NR_j + G_k + (G*LOC)_{km} + (G*NR)_{jk} + (G*L*NR)_{jkm} + E_{ijkm}$$

El efecto de los ambientes (A), que son una combinación de localidades por fechas de siembra, fue probado usando el modelo (que manda al residual A\*NR y A\*NR\*G) abajo indicado:

$$4. Y_{ijkl} = A_i + R_i + NR_j + G_k + (G*A)_{kl} + (G*NR)_{jk} + E_{ijkl}$$

En los tres últimos modelos, las repeticiones fueron tomadas como un factor aleatorio.

Fue realizado un análisis combinado de experimentos en las dos localidades y en las dos fechas de siembra con el modelo factorial (LeClerg *et al.*, 1960):

$$5. Y_{ijkmn} = LOC_m + FS_n + (LOC*FS)_{mn} + R_i + (R*LOC*FS)_{imn} + NR_j + (NR*LOC)_{jm} + (NR*FS)_{jn} + (NR*R*LOC)_{jim} + G_k + (G*LOC)_{km} + (G*NR)_{jk} + (G*FS)_{kn} + (G*NR*LOC)_{kjm} + (G*NR*FS)_{kjn} + (NR*LOC*FS)_{jmn} + E_{ijkmn}$$

Donde los efectos de LOC, FS y LOC\*FS se probaron con el error R\*LOC\*FS; los efectos de NR y LOC\*FS\*NR se probaron con el error NR\*R\*LOC.

Para las variables con significancia estadística fueron realizadas las comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad.

El análisis de componentes principales fue usado como una técnica descriptiva para reducir la dimensionalidad de los datos y observar las correlaciones entre las variables.

Tomando en cuenta que la regresión “puede ser peligrosa cuando las variables predictoras están intensamente correlacionadas de alguna manera” (Johnson, 2000), y con base en las correlaciones para el análisis de componentes principales fueron seleccionadas las variables que estuvieran menos correlacionadas entre sí para realizar

una regresión múltiple paso a paso y una regresión por cada nivel de riego y localidad. Las variables seleccionadas fueron TD, LE, CL2, DM, y AP, con las cuales fueron realizadas regresiones paso a paso para las dos localidades y para los dos niveles de riego. AP quedó eliminada en todas las regresiones. Las regresiones simples de las variables sirvieron también para conocer su comportamiento a través de las décadas o eras.

El avance del rendimiento en forma combinada por los cuatro ambientes, por fecha de siembra dentro de cada localidad, entre localidades, y por niveles de riego fue medido con un análisis de regresión simple. El valor del coeficiente de regresión fue dividido entre el valor de la ordenada al origen, y el resultado multiplicado por cien para obtener la tasa o porcentaje de avance genético por era y por año.

Con el fin de determinar las diferencias entre las unidades calor acumuladas de los genotipos en la primera y segunda fecha de siembra por cada localidad se realizó con el software Minitab versión 17 una prueba t pareada que compara medidas que están hechas sobre la misma variable en diferentes condiciones

Para hacer las gráficas y las regresiones fue usado Minitab 17. Las gráficas de las interacciones entre era- genotipos y niveles de riego y entre eras-genotipos y fechas de siembra permitieron distinguir variedades con menos interacción ambiental.

### 3.8 Propiedades químicas y físicas de los suelos de las localidades de prueba

El suelo en Celaya resultó ser moderadamente alcalino y muy ligeramente salino, con alto contenido de calcio, magnesio, y potasio; medio de nitrógeno y sodio, y bajo en fósforo. El suelo en Montecillo también resultó alcalino y muy ligeramente salino, con alto contenido de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, contenido medio de potasio y muy alto en sodio (Cuadros 8 y 9).

**Cuadro 8. Propiedades químicas del suelo de las dos localidades de prueba Celaya, Gto y Montecillo, Méx.**

Localidad	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Nt (%)	P (ppm)	Ca (meq 100 g <sup>-1</sup> )	Mg (meq 100 g <sup>-1</sup> )	K (meq 100 g <sup>-1</sup> )	Na (meq 100 g <sup>-1</sup> )
Celaya	7.76	0.82	0.12	0.25	26.55	9.25	2.33	0.84
Montecillo	8.24	0.58	0.26	13.9	19.79	10.32	0.52	1.42

pH= reacción del suelo, CE= conductividad eléctrica, P=fósforo extractable, Ca=calcio intercambiable, Mg=magnesio intercambiable, K=potasio intercambiable, Na=sodio.

Los suelos de las dos localidades son arcillosos aunque el de Celaya con una mayor proporción de arcilla, lo que permitió retener más humedad y en consecuencia disminuir el número de riegos durante el ciclo de cultivo (Cuadro 9).

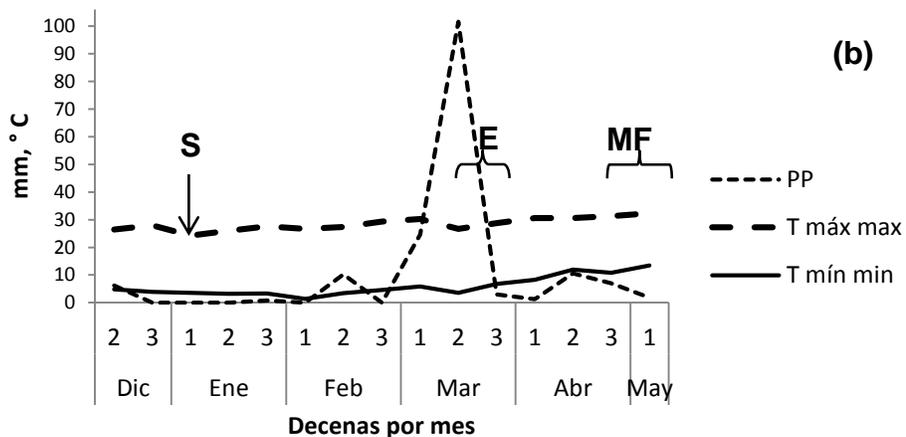
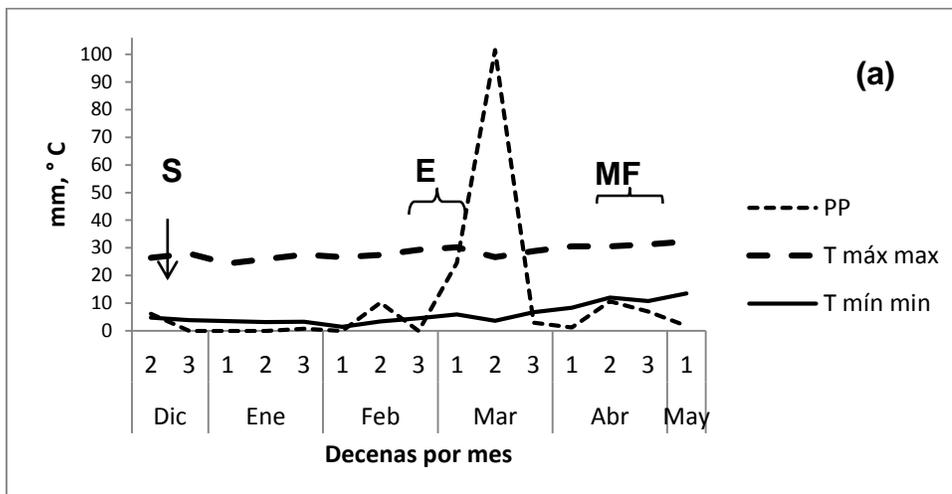
**Cuadro 9. Propiedades físicas del suelo de las dos localidades: Celaya, Gto y Montecillo, Méx.**

Localidad	Arcilla (%)	Textura	CC (%)	PMP (%)
Celaya	70.4	Arcillosa	45.1	31.7
Montecillo	53.5	Arcillosa	39.1	33.0

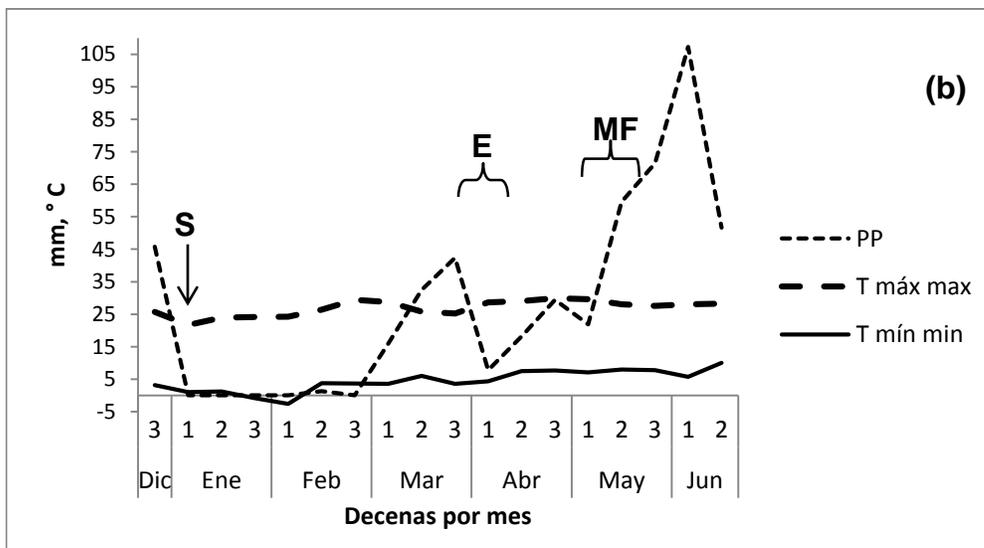
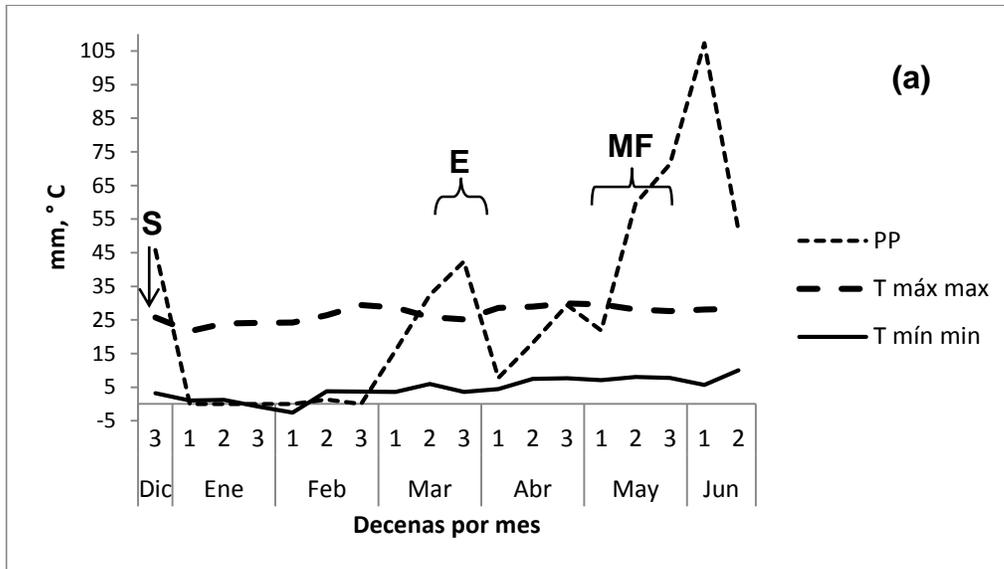
CC= capacidad de campo, PMP=punto de marchitez permanente.

### **3.9 Temperatura máxima *maximorum*, temperatura mínima *minimorum*, y precipitación durante el desarrollo de los experimentos**

Las Figuras 1a y 1b muestran la temperatura máxima *maximorum* y mínima *minimorum* del aire registradas a intervalos de 10 días y la precipitación pluvial acumulada en el mismo intervalo desde la siembra hasta la cosecha realizada el 12 de mayo en Celaya y 12 de junio en Montecillo. En dichas figuras están señalados la siembra, el periodo de espigamiento de las variedades y su periodo de madurez fisiológica. De manera específica, el 9 de marzo empezó a llover en Celaya pero no de manera continua, más bien hubo días en que llovió mucho como el 14 de marzo con 67.4 mm y otros días sin lluvia; además, hubo días nublados y fríos durante ese mes por ejemplo, el 14 de marzo la temperatura media del día fue 9.4 °C. En Celaya, la precipitación normal de marzo es 7.1 mm, considerando los años de 1951 a 2010, pero este año llovieron 129.2 mm en el mismo mes superando la máxima de 56.0 mm registrada en marzo de 1981. A excepción de marzo, la precipitación de los demás meses fue normal, siendo el total acumulado 167 mm durante el ciclo de cultivo comparado con 64.2 mm como promedio de los últimos 60 años para el mismo periodo. De los meses de diciembre a febrero la temperatura máxima del aire no rebasó los 30 °C sino hasta la primera decena de marzo y luego a partir de abril sin llegar a los 33 °C; las temperaturas más altas coincidieron con el periodo de llenado de grano y madurez fisiológica.



**Figura 1. Temperatura máxima *maximorum*, mínima *minimorum*, y precipitación acumulada de cada decena durante el ciclo de cultivo, a) primera fecha de siembra y b) segunda fecha de siembra en Celaya. S= siembra, E= espigamiento, MF=madurez fisiológica.**



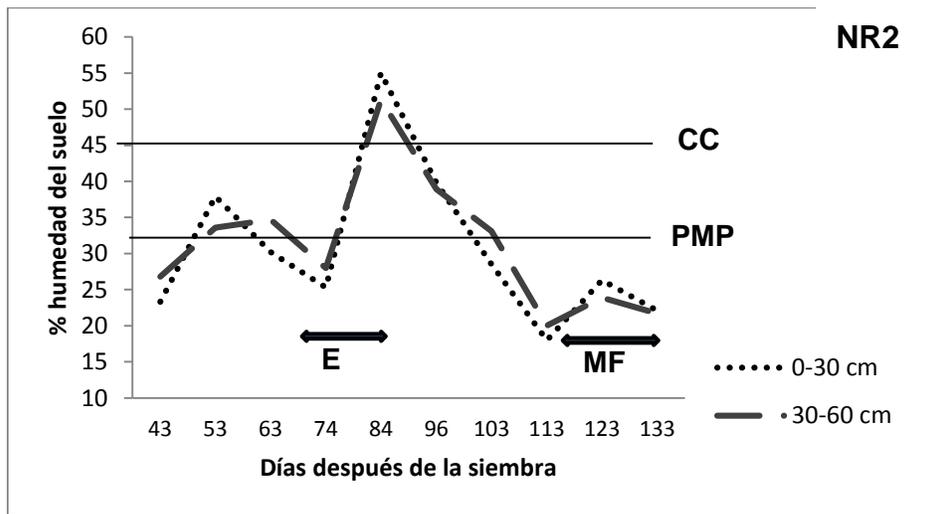
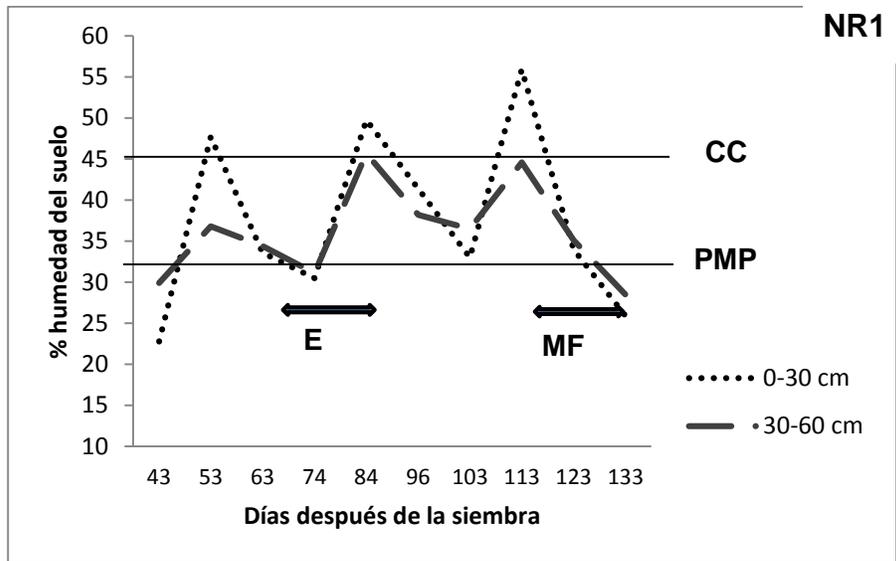
**Figura 2. Temperatura máxima *maximorum*, mínima *minimorum* y precipitación de cada decena durante el ciclo de cultivo, a) primera fecha de siembra y b) segunda fecha de siembra en Montecillo. S= siembra; E= espigamiento; MF=madurez fisiológica.**

Para Montecillo (Figura 2) a diferencia de Celaya (Figura 1), la lluvia inició el 6 de marzo y se formalizó de manera continua, con días nublados, temperaturas bajas en la

mañana y en la noche, y vientos fuertes, incluso cayó granizo el 22 de marzo y el 8 de mayo. En marzo llovieron 90.8 mm lo que representa seis veces más de lo registrado para ese mes de 1951 a 2010. En abril y mayo normalmente llueven 30.3 mm y 54.2 mm respectivamente, este año el acumulado fue 55.4 mm en abril y 152.9 mm en mayo muy cercano al máximo detectado en mayo de 1952 que fue 159.0 mm. El total de lluvia durante el ciclo del cultivo fue 505.2 mm comparado con los 175 mm que en promedio se acumularon en el mismo periodo los últimos 60 años. La temperatura máxima estuvo en un rango de 21.7 a 29.9 °C.

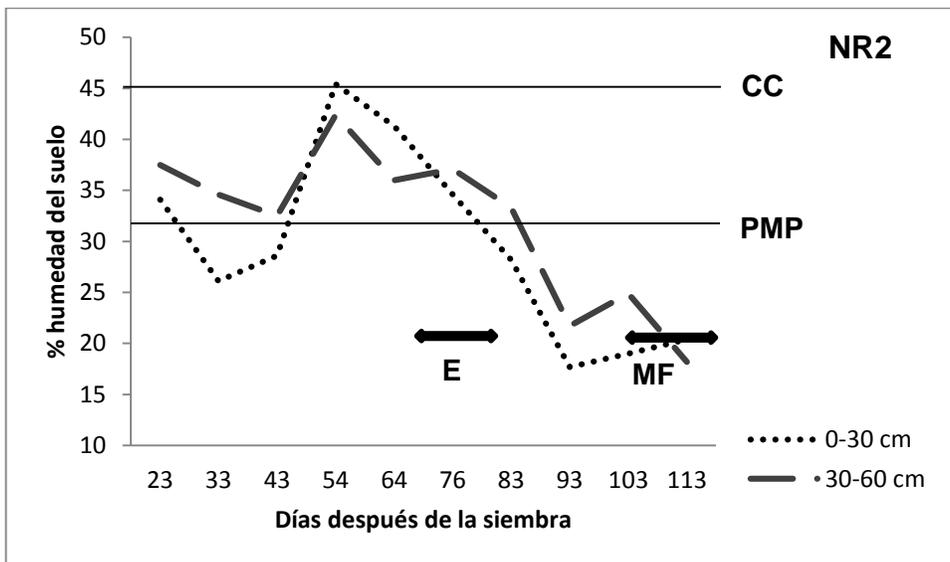
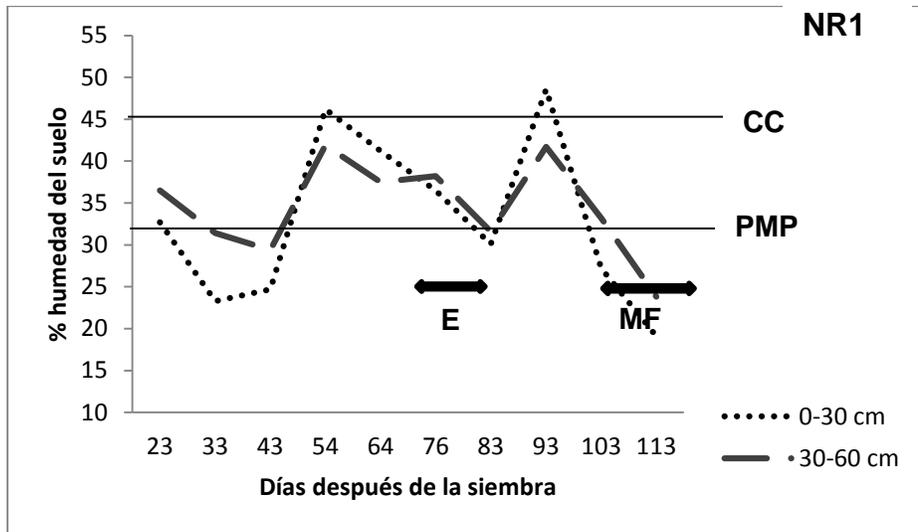
### **3.10 Contenido hídrico del suelo**

En la localidad de Celaya, primera fecha de siembra, la humedad del suelo bajo el tratamiento de riego normal (NR1) permaneció arriba de PMP para las plantas durante prácticamente todo el ciclo de cultivo, excepto a los 43 días después de la siembra (Figura 3). La humedad a una profundidad de 0-30 cm fue diferente de la humedad a 30-60 cm. Lo mismo ocurrió con el tratamiento de riego limitado (NR2); el periodo por debajo de PMP fue de los 63 a los 75 días por el manejo del riego y luego a partir de los 100 días hasta el final del ciclo del cultivo, de modo que durante la floración e inicio del periodo de llenado de grano las plantas contaron con agua proveniente de las lluvias y el riego de los 80 días (Figura 3). La humedad en los primeros 30 cm no fue diferente de la humedad en los siguientes 30 cm.



**Figura 3. Contenido de humedad edáfica en dos profundidades (0-30, 30-60 cm) bajo riego normal (NR1) y bajo riego limitado (NR2) de la primera fecha de siembra en Celaya. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.**

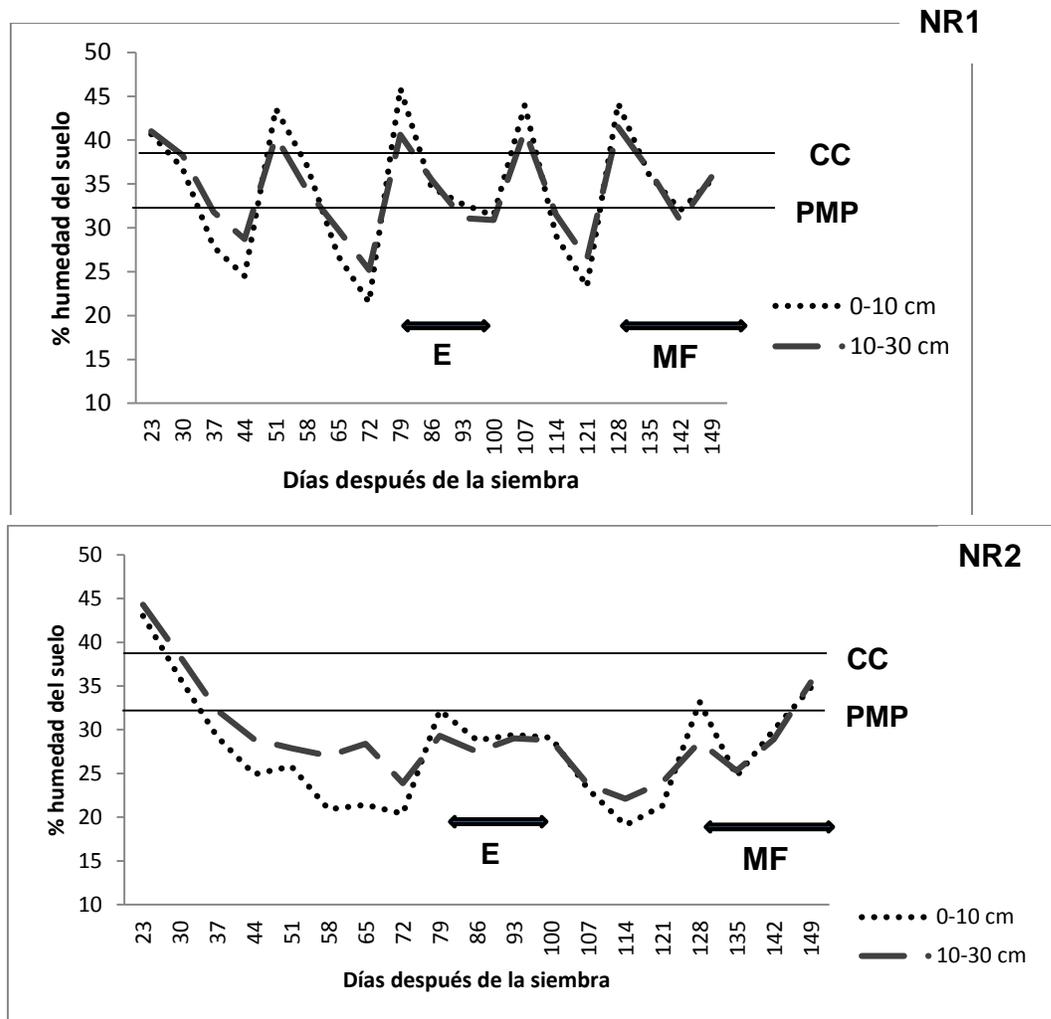
En la segunda fecha de siembra de Celaya la diferencia entre los dos niveles de riego se observa durante el llenado de grano y madurez fisiológica cuando la humedad del suelo estuvo debajo de PMP en las parcelas bajo riego limitado (Figura 4)



**Figura 4. Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-30 cm, 30-60 cm) en el NR1 y NR2 de la segunda fecha de siembra en Celaya. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.**

En Montecillo, primera fecha de siembra, para el tratamiento de riego normal (Figura 5) la humedad edáfica por debajo de PMP, en el periodo vegetativo, se presentó en dos ocasiones, mientras que antes de madurez fisiológica sólo en una ocasión. En contraste, la condición de riego limitado se ve reflejada desde los 37 días después de la

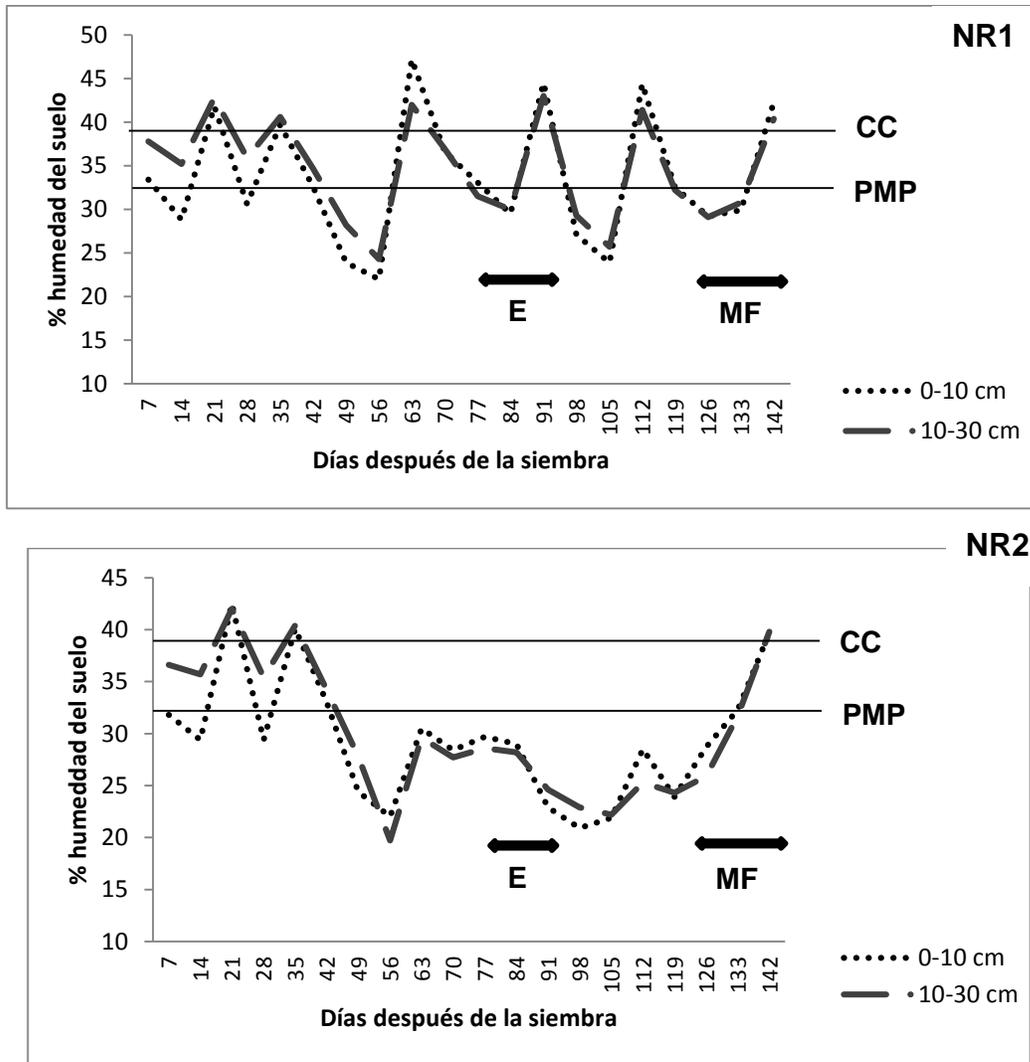
siembra y permaneció así a pesar del comienzo de las lluvias continuas a partir de los 74 días después de la siembra.



**Figura 5. Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-10 cm, 10-30 cm) en el NR1 y NR2 de la primera fecha de siembra en Montecillo. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.**

En la segunda fecha de siembra en Montecillo, el PMP fue permanente bajo riego limitado desde los 42 días después de la siembra hasta los 133 días (a la mitad del

periodo de madurez fisiológica) y el déficit hídrico en el suelo pudo ser más severo de no haber empezado el temporal a partir de los 57 días (Figura 6).



**Figura 6. Contenido de humedad edáfica a dos profundidades (0-10, 10-30 cm) en el NR 1 y NR2 de la segunda fecha de siembra en Montecillo. E=espigamiento, MF= madurez fisiológica.**

Los genotipos bajo riego limitado de la segunda fecha de siembra en Celaya enfrentaron un periodo de déficit de humedad edáfica que abarcó desde el inicio del

periodo de llenado de grano hasta que terminaron de madurar. En contraste, las plantas bajo riego limitado de la primera fecha de siembra contaron con humedad edáfica desde el espigamiento hasta 22 días después del espigamiento aproximadamente. Para la primera y segunda fecha de siembra en Montecillo, la lluvia atípica que se presentó después de haber suspendido el riego (407.7 mm total desde la primera semana de marzo hasta la primera semana de junio) y la menor retención de agua del suelo, comparada con el de Celaya, provocaron altibajos de humedad edáfica más pronunciados a una profundidad de 0 -10 cm. El PMP fue más permanente en Montecillo que en Celaya a pesar de que la lluvia acumulada en Montecillo fue mayor.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análisis de varianza para cada fecha de siembra

**Cuadro 10. Análisis de varianza de los datos de la primera fecha de siembra en Celaya, Gto.**

Variables	Cuadrados medios					
	NR	Error A	G	NR*G	Error B	CV (%)
AP	11.05	9.61	420.31*	11.06	14.19	3.99
CL1	35.70	0.68	26.70*	1.43	2.45	3.22
CL2	0.03	180.56	427.93*	15.93	17.49	12.54
TD	2.44	6.25	3.99*	3.03	3.15	8.10
DE	9.00	6.25	47.12*	3.53*	1.22	1.40
DM	340.40*	0.27	28.64*	1.91*	0.98	0.80
LE	1.50	1.15	4.73*	0.33*	0.14	4.04
NEE	2.72	1.75	4.09*	0.96	0.65	5.10
PMG	12.33	8.48	163.33*	3.27	3.29	5.11
IC	6.60x10 <sup>-3</sup>	1.76x10 <sup>-3</sup>	0.19*	1.78x10 <sup>-3</sup>	1.00x10 <sup>-3</sup>	10.66
BIO	1.57x10 <sup>6</sup>	1.03x10 <sup>6</sup>	2.14x10 <sup>6</sup>	1.48x10 <sup>5</sup>	2.34x10 <sup>5</sup>	10.64
EPMC	187.00	57.76	264.04*	47.26	61.84	13.77
GPMC	4.34x10 <sup>7</sup> *	3290.6	1.93x10 <sup>7</sup>	2.74x10 <sup>6</sup>	1.69x10 <sup>6</sup>	8.97
TLLG	74.17*	0.04	3030.32*	188.47	101.42	8.92
PHL	10.00	0.24	25.12*	0.73	1.23	1.46
RG	7.52x10 <sup>6</sup>	4.94x10 <sup>5</sup>	7.75x10 <sup>6</sup> *	3.92x10 <sup>5</sup>	2.00x10 <sup>5</sup>	8.60
GL	1	2	15	15	30	

NR = nivel de riego, G = genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por nivel de genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila a los 81 dds, CL2 = contenido de clorofila a los 96 dds, TD = temperatura del dosel en ° C a los 96 dds, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

**Cuadro 11. Análisis de varianza de los datos de la segunda fecha de siembra en Celaya, Gto.**

Variables	Cuadrados medios					
	NR	Error A	G	NR*G	Error B	CV (%)
AP	207.00	18.38	319.46*	8.98	9.74	3.62
CL1	50.41	52.20	64.26*	12.43	23.35	4.83
CL2	129.67	4.67	13.99	12.46	8.06	11.04
TD	77.22	1.18	2.07*	0.95	0.77	4.48
DE	2.25	0.25	50.43*	0.55	0.47	0.92
DM	232.56	0.56	53.20*	0.88	0.53	0.66
LE	0.60	0.03	5.11*	0.22	0.13	4.22
NEE	15.40	0.81	5.41*	0.70*	0.33	3.51
PMG	316.39*	1.66	55.40*	6.46	4.18	7.10
IC	1.50x10 <sup>-2</sup>	2.21x10 <sup>-3</sup>	1.08x10 <sup>-2</sup> *	3.25x10 <sup>-3</sup>	2.46x10 <sup>-3</sup>	15.25
BIO	1.38x10 <sup>6</sup>	3.41x10 <sup>5</sup>	1.34x10 <sup>6</sup>	3.29x10 <sup>5</sup>	1.83x10 <sup>5</sup>	13.73
EPMC	439.95	254.40	189.09*	81.47	50.64	7.12
GPMC	4.75x10 <sup>6</sup>	3.85x10 <sup>5</sup>	2.57x10 <sup>7</sup> *	4.77x10 <sup>6</sup> *	2.01x10 <sup>6</sup>	12.28
TLLG	930.71	136.07	3006.69*	307.09	170.14	13.46
PHL	153.14*	0.07	30.46*	3.05	2.82	2.34
RG	7.11x10 <sup>6</sup>	1.73x10 <sup>5</sup>	4.11x10 <sup>6</sup>	4.46x10 <sup>5</sup>	13.67	2.14x10 <sup>5</sup>
GL	1	2	15	15	30	

NR = nivel de riego, G = genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por nivel de genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila a los 80 dds, CL2 = contenido de clorofila a los 96 dds, TD = temperatura del dosel en ° C a los 96 dds, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

**Cuadro 12. Análisis de varianza de los datos de la primera fecha de siembra en Montecillo, Méx.**

Variables	Cuadrados medios					
	NR	Error A	G	NR*G	Error B	CV (%)
AP	2233.74	52.74	390.47*	28.84	15.48	4.11
CL1	25.87	29.02	15.08*	13.55	7.30	5.64
CL2	189.06	0.56	50.49*	16.51	15.46	9.03
TD	37.21	14.82	10.39	37.21	10.55	32.55
DE	165.76*	0.76	77.05*	1.06	1.25	1.23
DM	1314.06*	3.06	67.18*	8.59**	2.56	1.14
LE	3.85	0.83	4.58*	0.49	0.22	5.74
NEE	16.50	2.07	3.37*	0.44*	0.19	2.65
PMG	0.02	7.42	98.15*	2.83	1.47	3.24
IC	4.17x10 <sup>-3</sup>	4.53x10 <sup>-3</sup>	9.43x10 <sup>-3*</sup>	6.27x10 <sup>-4</sup>	1.00x10 <sup>-3</sup>	10.71
BIO	3.78x10 <sup>7</sup>	7.17x10 <sup>5</sup>	2.90x10 <sup>6*</sup>	8.04x10 <sup>5</sup>	4.60x10 <sup>5</sup>	12.97
EPMC	3000.30	539.40	432.52*	114.29	99.16	14.16
GPMC	3.57x10 <sup>8</sup>	1.96x10 <sup>7</sup>	4.14x10 <sup>7*</sup>	1.32x10 <sup>7*</sup>	2.47x10 <sup>6</sup>	9.18
TLLG	7234.56	1967.48	2469.23*	591.52*	159.16	9.95
PHL	0.42	0.20	16.02*	1.15	0.59	1.04
RG	5.31x10 <sup>7</sup>	4.67x10 <sup>6</sup>	7.76x10 <sup>6*</sup>	1.86x10 <sup>6*</sup>	5.06x10 <sup>5</sup>	11.13
GL	1	2	15	15	30	

NR = nivel de riego, G = genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por nivel de genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila a los 59 dds, CL2 = contenido de clorofila a los 81 dds, TD = temperatura del dosel en ° C a los 81 dds, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

**Cuadro 13. Análisis de varianza de los datos de la segunda fecha de siembra en Montecillo, Méx.**

Variables	Cuadrados medios					
	NR	Error A	G	NR*G	Error B	CV (%)
AP	1844.70*	0.10	378.40*	17.28*	8.29	3.08
CL1	0.68	24.75	22.93*	8.02	6.93	6.41
CL2	54.76	24.75	46.40*	14.22	7.20	5.91
TD	5.62x10 <sup>-3</sup>	1.21	2.23*	1.23	0.71	3.16
DE	129.39	3.51	56.55*	0.39	0.79	1.04
DM	1444.00	14.06	42.81*	3.36	1.96	1.06
LE	0.09	0.03	6.16*	0.08	0.36	6.87
NEE	0.72	0.76	3.47*	0.40	0.26	2.93
PMG	267.73	3.75	107.68*	4.01*	0.81	2.35
IC	4.00x10 <sup>-6</sup>	5.06x10 <sup>-6</sup>	0.01*	5.14x10 <sup>-4</sup>	6.17x10 <sup>-4</sup>	6.26
BIO	1.85x10 <sup>7</sup>	2.95x10 <sup>5</sup>	2.61x10 <sup>6*</sup>	2.72x10 <sup>5</sup>	1.66x10 <sup>5</sup>	8.79
EPMC	869.51	47.78	342.94*	94.41	130.99	18.11
GPMC	9.30x10 <sup>7*</sup>	6812.23	4.23x10 <sup>7*</sup>	4.37x10 <sup>6*</sup>	1.62x10 <sup>6</sup>	7.65
TLLG	3278.56	253.88	3950.85*	327.63	152.37	8.75
PHL	0.44	3.85	13.83*	0.91*	0.30	0.72
RG	434x10 <sup>7</sup>	4.74x10 <sup>5</sup>	8.69x10 <sup>6*</sup>	6.97x10 <sup>5</sup>	4.32x10 <sup>5</sup>	10.34
GL	1	2	15	15	30	

NR = nivel de riego, G = genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por nivel de genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila a los 64 dds, CL2 = contenido de clorofila a los 106 dds, TD = temperatura del dosel en ° C a los 106 dds, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

Las lluvias atípicas menguaron el efecto del tratamiento de riego limitado y con el modelo 1 de análisis de varianza en bloques completamente al azar no se encontraron diferencias (P=0.05) entre riego normal y limitado en casi todas las variables analizadas en cada fecha de siembra (Cuadros 10-13).

El nivel de riego produjo un efecto diferente en los días a madurez, el número de granos por metro cuadrado, y la tasa de llenado de grano en la primera fecha de siembra en Celaya (Cuadro 10); en la segunda fecha el nivel de riego causó una variación

significativa en PMG y PHL (Cuadro 11). En Montecillo para la primera fecha de siembra resultó significativa la diferencia del contenido de clorofila, días a espigamiento y a madurez entre los dos niveles de riego (Cuadro 12) y para la segunda, bajo riego normal la altura de planta y el número de granos por metro cuadrado fueron diferentes que bajo riego limitado (Cuadro 13). No hubo diferencias en el rendimiento de grano para ninguna fecha de siembra

Respecto al factor de variación "genotipo", éste produjo un efecto diferente ( $P=0.05$ ) en casi todas las variables estudiadas excepto BIO y GPMC en la primera fecha de siembra en Celaya, CL2 y BIO en la segunda. En Montecillo para la segunda fecha de siembra en todas las variables el efecto de genotipo fue significativo y en la primera fecha sólo en TD no hubo al menos un genotipo diferente al resto (Cuadros 10-13).

El efecto de la interacción nivel de riego por genotipo fue significativa ( $P=0.05$ ) para un mayor número de variables en Montecillo que en Celaya. Las variedades interaccionaron con el nivel de riego dando lugar a cambios en DE, DM, y LE en la primera fecha de siembra en Celaya, y en NEE y GPMC en la segunda (Cuadros 10-13).

La comparación de medias (Cuadro 14) de las variables que resultaron con diferencias significativas en el análisis de varianza, indica que los genotipos maduraron en promedio 4.7 y 9 días antes bajo riego limitado en las primeras fechas de siembra en Celaya y Montecillo respectivamente. El número de granos por metro cuadrado disminuyó 10.8 % y la tasa de llenado de grano 1.9 % al pasar de riego normal a riego limitado en la primera fecha de siembra en Celaya, mientras que en la segunda fecha de

siembra fue detectado el efecto diferencial del nivel de riego en el peso de mil granos y peso hectolítrico con una reducción de 14 y 4 % respectivamente por la sequía terminal.

**Cuadro 14. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables respecto de los dos niveles de riego de cada fecha de siembra de cada localidad.**

Variables	Celaya				Montecillo			
	1era FS		2da FS		1era FS		2da FS	
	RN	RL	RN	RL	RN	RL	RN	RL
<b>AP</b>							98.95a	88.21b
DMS							1.03	
<b>CL2</b>					45.24a	41.80b		
DMS					2.38			
<b>DE</b>					92.09a	88.87b		
DMS					0.72			
<b>DM</b>	126.64a	121.98b			144.97a	135.91b		
DMS	1.58				2.64			
<b>PMG</b>			31.01a	26.57b				
DMS			4.17					
<b>GPMC</b>	15321.1a	13672.6b					17885.85a	15474.68
DMS	1109.4						262.17	
<b>PHL</b>			73.13a	70.04b				
DMS			1.99					
<b>TLLG</b>	113.95a	111.80b						
DMS	0.675							

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), FS= fecha de siembra, RN= riego normal, RL= riego limitado, AP = altura de planta en cm, CL2= contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, PMG = peso de mil granos en g, GPMC= granos por metro cuadrado, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>. DMS= diferencia mínima significativa

La comparación de medias así mismo muestra que bajo riego limitado las variedades adelantaron su espigamiento 3 días en la primera fecha de siembra de Montecillo y el contenido de clorofila se redujo en 7.6 %. La restricción del riego causó un menor número de granos por metro cuadrado (13.5 %) y plantas 3 cm menos altas que bajo riego normal.

## 4.2 Análisis de varianza para fechas de siembra de cada localidad

**Cuadro 15. Análisis de varianza para fechas de siembra en Celaya, Gto.**

Variable	Cuadrados medios						CV (%)
	FS	G	NR	FS*G	NR*G	Error	
AP	2221.94*	700.81*	156.86*	38.97*	14.38	11.43	3.38
CL1	2.18x10 <sup>8</sup> *	1.42x10 <sup>7</sup> *	7671.00	3.61x10 <sup>6</sup> *	1.08x10 <sup>6</sup>	1.96x10 <sup>6</sup>	17.23
CL2	2001.86*	262.10*	62.72	179.83*	12.84	17.20	11.11
TD	7.51x10 <sup>-6</sup> *	7.89x10 <sup>-8</sup>	2.03x10 <sup>-6</sup> *	1.44x10 <sup>-7</sup>	5.92x10 <sup>-8</sup>	9.00x10 <sup>-8</sup>	8.05
DE	435.12*	90.96*	10.12*	6.59*	1.59	1.23	1.45
DM	7056.72*	77.75*	567.84*	4.09*	1.83*	0.84	0.78
LE	5.78*	8.89*	0.10	0.94*	0.16	0.22	5.25
NEE	0.66	6.36*	14.17*	2.78*	0.61	0.46	4.13
PMG	1445.87*	199.32	226.84*	19.41*	3.68	5.47	7.28
IC	3.91x10 <sup>-3</sup>	0.02*	0.02*	2.69x10 <sup>-3</sup>	1.75x10 <sup>-3</sup>	2.13x10 <sup>-3</sup>	13.96
BIO	6.56x10 <sup>7</sup> *	3.03x10 <sup>6</sup> *	2.95x10 <sup>6</sup> *	4.54x10 <sup>5</sup> *	2.64x10 <sup>5</sup>	2.19x10 <sup>5</sup>	12.22
EPMC	853.87*	271.28*	600.31*	181.84*	46.72	63.37	14.54
GPMC	2.75x10 <sup>8</sup> *	3.99x10 <sup>8</sup> *	3.84x10 <sup>7</sup> *	5.21x10 <sup>6</sup> *	4.59x10 <sup>6</sup> *	2.12x10 <sup>6</sup>	11.17
TLLG	8184.32*	5659.30*	765.18*	377.71*	319.18*	143.18	11.41
PHL	1.65x10 <sup>10</sup> *	1.48x10 <sup>9</sup> *	3.21x10 <sup>9</sup>	1.06x10 <sup>8</sup>	4.82x10 <sup>7</sup>	6.09x10 <sup>7</sup>	5.80
RG	1.05x10 <sup>8</sup> *	1.09x10 <sup>8</sup> *	1.46x10 <sup>7</sup> *	9.84x10 <sup>5</sup> *	5.55x10 <sup>5</sup> *	2.18x10 <sup>5</sup>	10.88
GL	1	15	1	15	15	78	

FS= fecha de siembra, G= genotipo, NR= nivel de riego, FS\*G= interacción fecha de siembra y genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila antes de llenado de grano, CL2 = contenido de clorofila en el llenado de grano, TD = temperatura del dosel en ° C en el llenado de grano, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG= rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

Mediante este análisis se midió el efecto de las fechas de siembra (FS), niveles de riego (NR) y genotipos por cada localidad (ignorando FS\*NR y FS\*NR\*G que se mandaron al residual).

Cada uno de los factores de variación: fecha de siembra, nivel de riego, genotipo, y la interacción genotipo por fecha de siembra provocaron un cambio en casi todas las variables (P=0.05) en Celaya, lo que no sucedió con la interacción de los niveles de riego por los genotipos (Cuadro 15).

**Cuadro 16. Análisis de varianza para fechas de siembra en Montecillo, Méx.**

Variable	Cuadrados medios						CV (%)
	FS	G	NR	FS*G	NR*G	Error	
AP	2.38x10 <sup>-12</sup>	1.08x10 <sup>-11</sup>	7.01x10 <sup>-11*</sup>	6.42x10 <sup>-13</sup>	9.84x10 <sup>-13*</sup>	1.09x10 <sup>-12</sup>	3.94
CL1	1487.17*	29.89*	16.89	8.13	12.68	9.07	6.77
CL2	113.63*	77.44*	223.66*	19.46	9.82	15.00	8.71
TD	8978.00*	7.20	19.06	5.41	3.73	5.78	13.10
DE	595.12*	131.31*	294.03*	2.29*	0.73	0.99	1.13
DM	2664.50*	101.35*	2756.53*	8.65*	5.64	3.19	1.31
LE	7.90*	10.43*	1.36*	0.31	0.21	0.34	6.83
NEE	10.63*	6.25*	5.16*	0.59	0.16	0.49	4.13
PMG	19.77*	201.11*	136.33*	4.73	3.05	3.43	4.89
IC	0.08*	0.02*	2.21x10 <sup>-3</sup>	1.63x10 <sup>-3</sup>	9.90x10 <sup>-4</sup>	4.33x10 <sup>-4</sup>	8.45
BIO	1.12x10 <sup>7*</sup>	5.09x10 <sup>6*</sup>	5.46x10 <sup>7*</sup>	4.14x10 <sup>5</sup>	3.29x10 <sup>5</sup>	94.19x10 <sup>5</sup>	13.12
EPMC	1613.83*	575.42*	3550.08*	200.04	98.67	121.30	16.50
GPMC	5.95x10 <sup>6</sup>	8.07x10 <sup>7*</sup>	4.07x10 <sup>8*</sup>	2.99x10 <sup>6</sup>	7.34x10 <sup>6</sup>	4.36x10 <sup>6</sup>	12.36
TLLG	6430.35*	6199.96*	10126.7*	220.13	332.08	266.15	12.18
PHL	33.72*	28.84*	7.81x10 <sup>-5</sup>	1.01	1.06	0.60	1.03
RG	42913.50	1.61x10 <sup>7*</sup>	9.64x10 <sup>7*</sup>	3.34x10 <sup>5</sup>	1.04x10 <sup>6</sup>	7.21x10 <sup>5</sup>	13.32
GL	1	15	1	15	15	78	

FS= fecha de siembra, G= genotipo, NR= nivel de riego, FS\*G= interacción fecha de siembra y genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por genotipo, AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila antes de llenado de grano, CL2 = contenido de clorofila en el llenado de grano, TD = temperatura del dosel en ° C en el llenado de grano, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG= rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

En Montecillo las fuentes de variación: fechas de siembra, genotipos, y niveles de riego produjeron un efecto diferente en casi todas las variables de estudio (P=0.05) y no así las interacciones FS\*G y NR\*G. Las dos fechas de siembra sí se diferenciaron excepto para número de granos por metro cuadrado y rendimiento de grano (Cuadro 16).

### 4.3 Comparación de fechas de siembra

En la segunda fecha de siembra en Celaya la biomasa, el número de granos por metro cuadrado, y el rendimiento de grano disminuyeron 31, 20, y 35 % respectivamente en relación con la fecha 1 (Cuadro 17). Las espigas fueron más cortas en la primera

fecha de siembra pero esto no causó una diferencia en el número de espiguillas por espiga.

**Cuadro 17. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables de estudio de las dos fechas de siembra de cada localidad.**

Var / FS	Celaya				Montecillo			
	1	2	DIF	DMS	1	2	DIF	DMS
AP	94.49a	86.16b	8.33	1.19	93.36a	91.31b	2.05	1.31
CL1	48.78a	43.06b	5.72	1.26	47.89a	41.08b	6.81	1.01
CL2	41.26a	33.35b	7.91	1.46	43.52b	45.41a	1.89	1.28
TD	21.73a	19.44b	2.29	0.56	9.97b	26.72a	16.75	0.85
DE	78.34a	74.70b	3.64	0.39	90.48a	86.17b	4.31	0.35
DM	124.27a	109.42b	14.85	0.32	140.43a	131.31b	9.12	0.63
LE	9.15a	8.72b	0.43	0.16	8.75a	8.26b	0.49	0.20
NEE	NS				17.30a	16.72b	0.58	0.25
PMG	35.51a	28.79b	6.72	0.82	37.42b	38.21a	0.79	0.65
IC	NS				0.347b	0.396a	0.05	0.01
BIO	4550.38a	3118.80b	1431.6	164.89	5231.5a	4640.1b	681.4	227.98
EPMC	57.11a	51.95b	5.16	2.80	70.29a	63.19b	7.1	3.88
GPMC	14496.9a	11563.9b	2933	512.47	NS			
TLLG	112.88a	96.88b	16	4.21	126.83b	141.01a	14.2	5.74
PHL	75.91a	71.74b	4.17	0.55	74.57b	75.60a	1.03	0.27
RG	5199.4a	3384.4b	1815	164.36	NS			

<sup>1</sup>Según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), FS= fecha de siembra, DIF= diferencia entre las medias, DMS= diferencia mínima significativa, NS= no significativo. AP= altura de planta en cm, CL1= contenido de clorofila antes de llenado de grano, CL2= contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano, TD= temperatura del dosel en °C tomado en llenado de grano, DE= días a espigamiento, DM= días a madurez, LE= longitud de espiga, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG= peso de mil granos en g, IC= índice de cosecha, BIO= biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC= espigas por metro cuadrado, GPMC= granos por metro cuadrado, TLLG= tasa de llenado de grano en k ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL= peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG= rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>.

A pesar de que la biomasa fue 11 % mayor y hubo 7 espigas más por metro cuadrado en la primera fecha de siembra en Montecillo, en la segunda fecha (y no en la primera) fueron obtenidos mayor índice de cosecha y peso de mil granos (Cuadro 17).

El Cuadro 18 muestra un resumen comparando el rendimiento obtenido por cada nivel de riego por cada fecha de siembra y contrastando el rendimiento entre las fechas de siembra dentro de cada localidad. De este cuadro lo que destaca es que hubo diferencias significativas solamente entre los rendimientos de la primera y segunda fecha de siembra en Celaya.

**Cuadro 18. Comparación de medias<sup>1</sup> del rendimiento de grano obtenido en cada nivel de riego y en cada fecha de siembra en Celaya, Gto. y Montecillo, Méx.**

FS	RN	RL	DIF	DMS	P	% Reducción
	Celaya					
Primera	5542.3	4856.5	685.8	1193.0	0.0866	12.4
Segunda	3717.7	3051.2	666.5	1321.9	0.0986	17.9
DIF	1824.6	1805.3				
DMS	196.5	266.2				
P	0.0001	0.0001				
% Reducción	32.9	37.2				
FS	Montecillo		DIF	DMS	P	% Reducción
Primera	7303.6	5480.9				
Segunda	7180.0	5531.3	1648.7	2188.7	0.0663	22.9
DIF	128.3	50.4				
DMS	338.43	366.2				
P	0.4620	0.7810				
% Reducción	2.7	0.91				

<sup>1</sup>Según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), RN= riego normal, RL=riego limitado, FS= fecha de siembra, DIF= diferencia entre medias, DMS= diferencia mínima significativa, P= significancia del análisis de varianza.

#### 4.4 Análisis de varianza para localidades

Para probar el efecto de las localidades mediante el análisis de varianza fue aplicado el modelo 3. Entre localidades hubo diferencias significativas en casi todas las variables (Cuadro 19); entre genotipos todos los caracteres, excepto TD, se expresaron de manera distinta; para niveles de riego e interacción niveles de localidad por niveles de genotipo sólo hubo cambios en algunas variables ( $P=0.05$ ), y el factor interacción NR\*G no produjo cambios. El cuadro 19 muestra la comparación de medias de estas variables para las dos localidades. La biomasa, el número de granos por metro cuadrado, y el rendimiento fueron menores en 23, 23, y 33 % respectivamente en Celaya comparando con lo obtenido en Montecillo.

**Cuadro 19. Análisis de varianza para localidades.**

Variable	Cuadrados medios						CV (%)
	LOC	G	NR	LOC*G	NR*G	Error	
AP	1223.25*	1370.88*	1314.06*	63.91*	27.74	28.93	5.81
CL1	3.56x10 <sup>9</sup>	2.42x10 <sup>9</sup> *	4.14x10 <sup>8</sup>	1.31x10 <sup>9</sup>	3.74x10 <sup>8</sup>	7.98x10 <sup>8</sup>	29.81
CL2	9.28x10 <sup>6</sup> *	5.01x10 <sup>5</sup> *	9.67x10 <sup>4</sup>	4.11x10 <sup>5</sup> *	3.17x10 <sup>4</sup>	9.69x10 <sup>4</sup>	25.87
TD	372.49*	6.49	0.27	2.96	3.50	48.42	35.57
DE	8765.64*	209.99*	97.51*	12.29	0.96	7.59	3.34
DM	23172.45*	166.77*	2913.30*	12.32	3.22	53.63	5.79
LE	11.73*	18.88*	1.10	0.44	0.17	0.40	7.28
NEE	28.28*	11.59*	1.11	1.08	0.37	0.71	5.08
PMG	2056.05*	381.74*	357.44*	18.68	4.32	13.24	10.40
IC	0.11*	0.03*	4.71x10 <sup>-3</sup>	6.56x10 <sup>-3</sup> *	1.12x10 <sup>-3</sup>	2.05x10 <sup>-3</sup>	12.91
BIO	7.76x10 <sup>7</sup> *	6.39x10 <sup>6</sup> *	4.15x10 <sup>7</sup> *	1.73x10 <sup>6</sup> *	3.62x10 <sup>5</sup>	7.79x10 <sup>5</sup>	20.12
EPMC	2.45*	0.17*	0.96*	0.06*	0.02	0.03	4.39
GPMC	9.56x10 <sup>8</sup> *	8.79x10 <sup>7</sup> *	3.48x10 <sup>8</sup> *	3.27x10 <sup>7</sup> *	7.12x10 <sup>6</sup>	4.89x10 <sup>6</sup>	14.78
TLLG	53963.87*	8642.50*	8229.66*	3216.76*	304.68	295.45	14.39
PHL	1.96x10 <sup>18</sup> *	1.44x10 <sup>18</sup> *	1.11x10 <sup>18</sup> *	2.91x10 <sup>17</sup> *	3.44x10 <sup>16</sup>	9.93x10 <sup>16</sup>	13.60
RG	2.77x10 <sup>8</sup> *	2.12x10 <sup>7</sup> *	9.31x10 <sup>7</sup> *	5.76x10 <sup>6</sup> *	9.30x10 <sup>5</sup>	1.05x10 <sup>6</sup>	19.27
GL	1	15	1	15	15	191	

LOC= localidad, G= genotipo, NR= nivel de riego, LOC\*G= interacción localidad por genotipo, NR\*G= interacción nivel de riego por genotipo. AP = altura de planta en cm, CL1 = contenido de clorofila, CL2 = contenido de clorofila, TD = temperatura del dosel, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad, CV=coeficiente de variación.

El ciclo de cultivo fue más largo en Montecillo y los componentes de rendimiento y el rendimiento mismo fueron mejores en dicha localidad (Cuadro 20).

## Cuadro 20. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables de las localidades.

Variable	Celaya	Montecillo	DIF	DMS
AP	90.33b	94.70a	4.37	1.33
CL2	37.30b	44.46a	7.16	1.53
TD	20.76a	18.35b	2.41	1.78
DE	76.62b	88.32a	11.7	0.68
DM	116.84b	135.87a	19.03	1.80
LE	8.93a	8.50b	0.43	0.16
NEE	16.34b	17.01a	0.67	0.21
PMG	32.15b	37.82a	5.67	0.89
IC	0.330b	0.372a	0.04	0.01
BIO	3759.28b	4861.64a	1102.4	217.54
EPMC	53.53b	65.12a	12.59	2.68
GPMC	13030.4b	16896.0a	3865.6	545.38
TLLG	104.88b	133.92a	29.04	4.24
PHL	74.06b	75.19a	1.13	0.54
RG	4291.9b	6374.0a	2082.1	253.46

<sup>1</sup>Según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), DIF= diferencia entre medias, DMS= diferencia mínima significativa, AP = altura de planta en cm, CL2 = contenido de clorofila registrado en el periodo de llenado de grano, TD = temperatura del dosel, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>.

En Celaya las mejores variedades fueron 'Borlaug 100 F2014' y 'Nana F2007' respecto a RG y GPMC, y 'Borlaug 100' y 'Bacorehuis F2015' respecto a BIO. Sin embargo, las medias no son significativamente diferentes al 5 % en ningún caso excepto para 'Kentana 48' y 'Yaktana 54C' como las peores variedades en cuanto a GPMC (Cuadro 1A).

En Montecillo los genotipos sobresalientes respecto a RG fueron 'Baviacora M92' y 'Borlaug 100 F2014' y de acuerdo con la comparación de medias de Tukey dichas variedades no fueron significativamente diferentes del resto en cuanto a BIO y GPMC (Cuadro 1A).

El Cuadro 21, de acuerdo con el modelo 3, indica que el nivel de riego tuvo un efecto significativo en los componentes de rendimiento y días a madurez. Tal efecto está reflejado en la reducción de BIO, GPMC, y RG ordenadamente en 7.6, 8.1, y 14.6 % bajo

la condición de riego limitado en Celaya, y en 23.4, 19.1, y 24 % en las mismas variables para Montecillo bajo riego limitado.

**Cuadro 21. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables para niveles de riego por localidad.**

Variable/NR	Celaya				Montecillo			
	1	2	DIF	DMS	1	2	DIF	DMS
AP	91.43a	89.22b	2.21	1.19	98.53a	87.22b	11.31	1.31
CL2	NS				45.78a	43.14b	2.64	1.28
TD	19.92b	21.11a	1.19	0.57	NS			
DE	76.25b	76.79a	0.54	0.39	89.84a	86.81b	3.03	0.35
DM	118.95a	114.74b	4.21	0.32	140.51a	131.23b	9.28	0.63
LE	NS				8.61a	8.40b	0.21	0.20
NEE	16.01b	16.67a	0.66	0.24	17.21a	16.81b	0.4	0.25
PMG	33.48a	30.81b	2.67	0.82	38.85a	36.78b	2.07	0.65
IC	0.343a	0.317b	0.026	0.016	NS			
BIO	3986.63a	3682.55b	304.08	164.89	5589.00a	4282.30b	1306.7	227.98
EPMC	56.69a	52.36b	4.33	2.80	72.01a	61.48b	10.53	3.88
GPMC	13578.70a	12482.00b	1096.7	512.47	18680.30a	15111.60b	3568.7	735.07
TLLG	107.32a	102.43b	4.89	4.21	142.81a	125.02b	17.79	5.74
PHL	74.79a	72.95b	1.84	0.55	NS			
RG	4630.02a	3953.85b	676.17	164.36	7241.80a	5506.10b	1735.7	298.96

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), NR= nivel de riego: 1=riego normal, 2= riego limitado, DIF= diferencia entre medias, DMS= diferencia mínima significativa, NS= no significativo. AP = altura de planta en cm, CL2 = contenido de clorofila, TD = temperatura del dosel, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>.

#### 4.5 Análisis de varianza de los ambientes

Los ambientes, combinación de localidad y fecha de siembra, produjeron un efecto significativamente diferente en todas las variables presentadas en el Cuadro 22. En este análisis no se consideraron las interacciones A\*NR y A\*NR\*G. Los factores de variación: genotipo e interacción genotipo por ambiente también causaron cambios significativos excepto para la temperatura del dosel. El nivel de riego causó un efecto diferente en DM,

LE, PMG, BIO, EPMC, GPMC, TLLG, PHL, y RG. La interacción genotipo por nivel de riego sólo fue significativa para AP, DM, y GPMC.

**Cuadro 22. Análisis de varianza combinado de los datos de los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades.**

Variable	Cuadrados medios						CV (%)
	G	NR	AMB	G*AMB	G*NR	Error	
AP	1370.88*	1314.06*	1201.43*	45.92*	27.74*	11.93	3.73
CL1	2.42x10 <sup>9</sup> *	4.14x10 <sup>8</sup>	3.24x10 <sup>10</sup> *	7.56x10 <sup>8</sup> *	3.74x10 <sup>8</sup>	3.06x10 <sup>8</sup>	18.46
CL2	190.20*	24.75	1799.12*	116.21*	10.61	16.25	9.86
TD	6.49	0.27	3173.10*	4.06	3.51	4.21	10.49
DE	209.99*	97.51*	3265.29*	7.05*	0.96	0.94	1.17
DM	166.77*	2913.30*	10964.55*	8.35*	3.23*	1.51	0.97
LE	18.88*	1.10*	8.47*	0.57*	0.17	0.27	6.00
NEE	11.54*	1.11	13.19*	1.48*	0.37	0.32	3.39
PMG	381.74*	357.45*	1173.89*	14.27*	4.32	4.25	5.89
IC	0.03*	4.71x10 <sup>-3</sup>	0.06*	3.63x10 <sup>-3</sup> *	1.12x10 <sup>-3</sup>	1.61x10 <sup>-3</sup>	11.41
BIO	6.39x10 <sup>6</sup> *	4.15x10 <sup>7</sup> *	5.14x10 <sup>7</sup> *	8.67x10 <sup>5</sup> *	3.62x10 <sup>5</sup>	4.07x10 <sup>5</sup>	14.55
EPMC	621.31*	3535.04*	4004.74*	202.43*	80.02	92.39	15.85
GPMC	8.79x10 <sup>7</sup> *	3.48x10 <sup>8</sup> *	4.12x10 <sup>8</sup> *	1.36x10 <sup>7</sup> *	7.12x10 <sup>6</sup> *	4.00x10 <sup>6</sup>	13.37
TLLG	8642.50*	8229.66*	22859.51*	1271.53*	304.68	232.63	12.77
PHL	65.96*	60.45*	243.43*	6.49*	1,75	1.88	1.49
RG	2.12x10 <sup>7</sup> *	9.30x10 <sup>7</sup> *	1.28x10 <sup>8</sup> *	2.36x10 <sup>6</sup> *	9.30x10 <sup>5</sup>	5.97x10 <sup>5</sup>	14.49
GL	15	1	3	45	15	175	

AMB=ambiente, NR= nivel de riego, G= genotipo, G\*AMB= interacción genotipo por ambiente, G\*NR= interacción genotipo por nivel de riego, AP= altura de planta en cm, CL1= contenido de clorofila primera fecha, CL2 = contenido de clorofila segunda fecha, TD = temperatura del dosel en °C, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad. CV=coeficiente de variación.

No obstante, el rendimiento del ambiente 2 no fue diferente al del ambiente 4, la biomasa y el número de espigas por metro cuadrado si resultaron significativamente mejores en el ambiente 2, además en éste las plantas tardaron 4 días más en espigar y 9 días más en madurar; aún más notoria es la diferencia entre los días a madurez del

ambiente 2 con el 3 que fue de 31 días menos en el ambiente 3 y en cuanto al rendimiento de grano que fue 47 % menor en el ambiente 3 (Cuadro 23).

**Cuadro 23. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables estudiadas en los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades.**

Variable	Ambiente				DMS
	1	2	3	4	
AP	94.45ab	95.82a	86.16c	93.59b	1.59
CL1	48.81a	48.10a	43.19b	41.35c	1.46
CL2	33.34d	43.52b	41.25c	45.41a	1.65
TD	21.91b	9.97d	19.61c	26.72a	0.89
DE	78.47c	90.48a	74.78d	86.17b	0.44
DM	124.27c	140.44a	109.42d	131.31b	0.57
LE	9.15a	8.26c	8.72b	8.75b	0.21
NEE	16.41c	16.72b	16.27c	17.30a	0.26
PMG	35.51b	37.42a	28.78c	38.21a	0.72
IC	0.336bc	0.347b	0.325c	0.396a	0.017
BIO	4550.4b	5231.5a	3118.8c	4640.1b	235.41
EPMC	57.12c	70.29a	51.95d	63.19b	4.26
GPMC	14496.9b	17111.7a	11563.9c	16680.3a	643.7
TLLG	112.88c	126.83b	96.88d	141.01a	5.56
PHL	75.83a	74.57b	71.58c	75.59a	0.51
RG	5199.4b	6392.3a	3384.4c	6355.6a	267.87

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), Ambientes 1= Celaya primera fecha de siembra, 2= Montecillo primera fecha de siembra, 3= Celaya segunda fecha de siembra, 4= Montecillo segunda fecha de siembra, DMS= diferencia mínima significativa, AP= altura de planta en cm, CL1= contenido de clorofila primera fecha, CL2 = contenido de clorofila segunda fecha, TD = temperatura del dosel en la segunda fecha, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>.

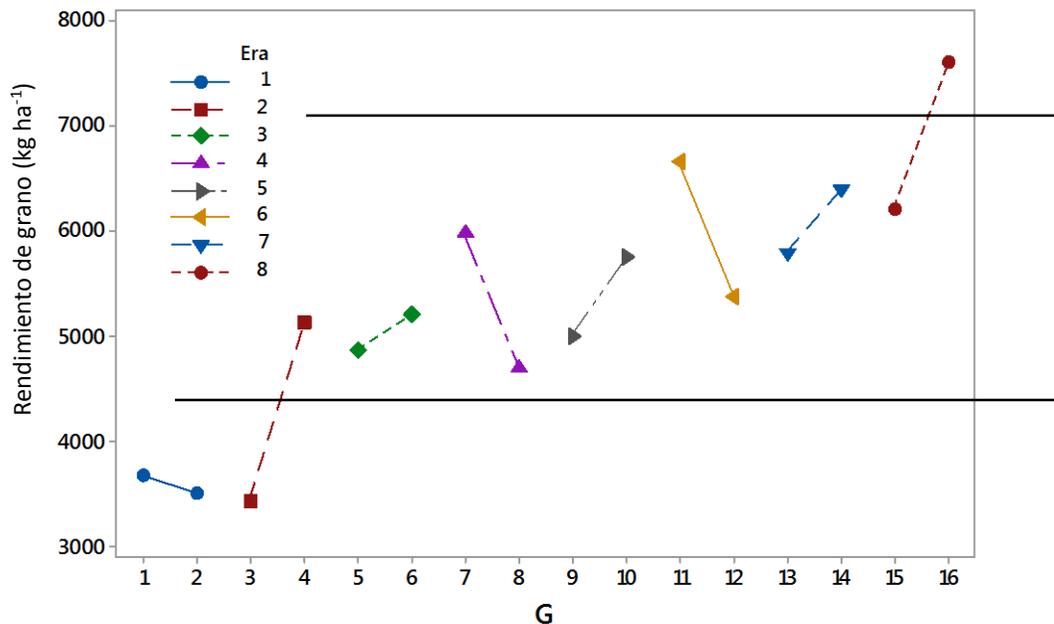
En general, la pérdida en RG, GPMC, y BIO por pasar de riego limitado a riego normal fue 20.3, 14.5, y 16.8 % respectivamente. Bajo riego normal, el ciclo del cultivo se extendió casi 7 días y PMG, EPMC, TLLG, y PHL fueron superiores que en condiciones de riego limitado (Cuadro 24).

**Cuadro 24. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables de los ambientes derivados de la combinación de fechas de siembra y localidades para niveles de riego.**

Variable/NR	NR		DIF	DMS
	1	2		
AP	94.78a	90.25b	4.53	1.33
DE	83.09a	81.85b	1.24	0.68
DM	129.73a	122.98b	6.75	1.80
PMG	36.16a	33.80b	2.36	0.89
BIO	4787.97a	3982.42b	805.55	217.54
EPMC	64.35a	56.92b	7.43	2.68
GPMC	16129.5a	13796.8b	2332.7	545.38
TLLG	125.07a	113.73b	11.34	4.24
PHL	74.88a	73.91b	0.97	0.54
RG	5935.91a	4729.97b	1205.9	253.46

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ), NR= nivel de riego, 1=riego normal, 2= riego limitado, DIF= diferencia entre medias, DMS= diferencia mínima significativa, AP= altura de planta en cm, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, PMG = peso de mil granos en g, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>.

Con relación a las variedades, la comparación de medias separó tres grupos por RG. El primer grupo sólo lo conforma 'Borlaug 100 F2014' siendo la mejor variedad en los cuatro ambientes. En el tercer grupo están las peores variedades: 'Kentana 48', 'Chapingo 48', y 'Yaktana 54C'. El resto de las variedades corresponden al grupo 2 (Cuadro 2A). En la Figura 7 puede observarse también este resultado donde los genotipos de la misma era aparecen del mismo color y forma.



**Figura 7. Rendimiento de grano como promedio de los cuatro ambientes por cada genotipo. G= genotipos: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

#### 4.6 Análisis de varianza combinado

Del modelo 5 procede el Cuadro 25 que confirma los resultados de los tres modelos anteriores e incluye las interacciones no consideradas previamente.

**Cuadro 25a. Análisis de varianza de los experimentos combinados.**

Variables	Cuadrados medios					
	NR	Error B	LOC	FS	LOC*FS	Error A
AP	1314.06*	25.67	1223.25*	1785.06*	595.97*	26.62
CL1	5.49	10.81	75.36	2687.77*	7.25	8.06
CL2	24.75	65.30	3281.85*	1534.68*	580.81*	6.00
TD	0.27	6.37	372.49*	3345.28*	5804.53*	0.86
DE	97.51*	1.25	8765.64*	1024.00*	6.25	0.58
DM	2913.30*	1.41	2.31x10 <sup>4</sup> *	9196.81*	524.4*	0.46
LE	1.10	0.68	11.73*	0.08	13.59*	0.41
NEE	1.11	1.34	28.29*	2.99*	8.30*	0.06
PMG	357.44*	9.84	2056.05*	563.76*	901.87*	1.99
IC	4.71x10 <sup>-3</sup>	3.05x10 <sup>-3</sup>	0.11*	0.02	0.06*	1.85x10 <sup>-3</sup>
BIO	4.15x10 <sup>7</sup> *	1.12x10 <sup>6</sup>	7.76x10 <sup>7</sup> *	6.54x10 <sup>7</sup> *	1.12x10 <sup>7</sup>	6.44x10x10 <sup>5</sup>
EPMC	3535.04	365.71	9545,51*	2407.74*	59.96	75.88
GPMC	3.48x10 <sup>8</sup> *	5.2x10 <sup>6</sup>	9.56x10 <sup>8</sup> *	1.81x10 <sup>8</sup> *	1.00x10 <sup>8</sup> *	2.41x10 <sup>6</sup>
TLLG	8229.66	941.51	5.39x10 <sup>5</sup> *	52.82	14561.82*	242.47
PHL	60.45*	1.60	121.55*	165.12*	443.63*	0.29
RG	9.31x10 <sup>7</sup> *	2.18x10 <sup>6</sup>	2.77x10 <sup>8</sup> *	5.48x10 <sup>7</sup> *	5.06x10 <sup>7</sup> *	5.12x10 <sup>5</sup>
GL	1	2	1	1	1	2

NR= nivel de riego, Error B= NR\*REP\*LOC usado para probar NR y LOC\*FS\*NR, LOC=localidad, FS= fecha de siembra, LOC\*FS= interacción localidad por fecha de siembra, Error A= REP\*LOC\*FS usado para probar LOC, FS, y LOC\*FS. AP= altura de planta en cm, CL1= contenido antes de llenado de grano, CL2 = contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano, TD = temperatura del dosel, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad.

Con el modelo 5 el efecto del nivel del riego sobre EPMC y TLLG no fue significativo y esta es la única diferencia entre dicho modelo y el 4 en cuanto al efecto de los cuatro factores por separado sobre las variables de estudio (Cuadro 25a).

Los Cuadros 25b y 25c indican que el efecto de las interacciones LOC\*NR, LOC\*G, FS\*G, NR\*G, y FS\*NR\*G fue diferente al efecto de los factores por separado sobre RG, en cambio FS\*NR, LOC\*FS\*NR, y LOC\*NR\*G no tuvieron un efecto significativo sobre RG.

**Cuadro 25b. Análisis de varianza de los experimentos combinados.**

Variables	Cuadrados medios					
	LOC*NR	LOC*G	FS*NR	FS*G	LOC*FS*NR	G
AP	2911.95*	63.91*	59.09*	39.25*	11.39	1370.88*
CL1	12.03	33.29	74.28*	17.52	19.85	66.37*
CL2	261.63*	149.33*	80.33*	135.45*	6.82	190.20*
TD	44.89*	2.96	67.03*	3.36	4.67	6.49
DE	206.64*	12.29	0.0	3.78*	2.25	209.99*
DM	411.07*	12.32*	0.52	3.00	6.12	166.77*
LE	0.36	0.45	4.56*	0.67*	0.02	18.88*
NEE	18.22*	1.08*	13.83*	1.19*	1.42	11.54*
PMG	5.73	18.68*	232.37*	10.13*	0.94	381.74*
IC	1.82x10 <sup>-2</sup> *	6.56x10 <sup>-3</sup> *	2.69x10 <sup>-3</sup>	2.61x10 <sup>-3</sup>	1.13x10 <sup>-4</sup>	0.03*
BIO	1.60x10 <sup>7</sup> *	1.73x10 <sup>6</sup> *	9,24x10 <sup>5</sup>	5.18x10 <sup>5</sup> *	7.85x10 <sup>5</sup>	6.39x10 <sup>6</sup> *
EPMC	615.35*	225.41*	80.88	286.25*	265.48	621.31*
GPMC	9.77x10 <sup>7</sup> *	3.27x10 <sup>7</sup> *	4.67x10 <sup>7</sup> *	3.62x10 <sup>6</sup>	5.87x10 <sup>6</sup>	8.79x10 <sup>7</sup> *
TLLG	2662.30*	3216.76*	8.71	352.08*	617.33	8642.50*
PHL	60.25*	14.45**	27.69*	2.69*	15.60	65.96*
RG	1.79x10 <sup>7</sup> *	5.76x10 <sup>6</sup> *	1.49x10 <sup>5</sup>	7.89x10 <sup>5</sup> *	9.57x10 <sup>4</sup>	2.12x10 <sup>7</sup> *
GL	1	15	1	15	30	15

LOC\*NR= interacción de localidad por nivel de riego, LOC\*G= interacción localidad por genotipo, FS\*NR= interacción fecha de siembra por nivel de riego, FS\*G= interacción fecha de siembra por genotipo, LOC\*FS\*NR= interacción localidad por fecha de siembra por nivel de riego G= genotipo. AP= altura de planta en cm, CL1= contenido antes de llenado de grano, CL2 = contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano, TD = temperatura del dosel, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad.

**Cuadro 25c. Análisis de varianza de los experimentos combinados.**

Variables	Cuadrados medios				CV (%)
	G*NR	FS*NR*G	LOC*NR*G	Error C	
AP	27.74*	14.37	11.86	14.22	4.07
CL1	11.07	6.17	9.13	10.66	7.25
CL2	10.61	17.45	12.05	18.81	10.61
TD	3.50	3.46	2.43	3.98	10.21
DE	0.96	1.35	1.36	1.48	1.47
DM	3.22	3.88	4.26	2.58	1.27
LE	0.17	0.34	0.20	0.27	5.97
NEE	0.38	0.37	0.39	0.54	4.44
PMG	4.32	4.71	2.41	3.82	5.58
IC	1.12x10 <sup>-3</sup>	1.72x10 <sup>-3</sup>	1.06x10 <sup>-3</sup>	1.54x10 <sup>-3</sup>	11.18
BIO	3.62x10 <sup>5</sup>	5.86x10 <sup>5*</sup>	2.30x10 <sup>5</sup>	2.78x10 <sup>5</sup>	12.04
EPMC	80.02	112.61	65.37	86.01	15.29
GPMC	7.11x10 <sup>6*</sup>	6.30x10 <sup>6</sup>	4.82x10 <sup>6*</sup>	2.74x10 <sup>6</sup>	11.06
TLLG	304.69	332.19*	346.57*	185.01	11.39
PHL	1.75	1.28	1.13	1.38	1.58
RG	9.30x10 <sup>5*</sup>	8.11x10 <sup>5*</sup>	6.69x10 <sup>5</sup>	4.23x10 <sup>5</sup>	12.20
GL	15	15	15	152	

G\*NR= interacción genotipo por nivel de riego, FS\*NR\*G= interacción fecha de siembra por nivel de riego por genotipo, LOC\*NR\*G= interacción localidad por nivel de riego por genotipo, Error C= error del modelo, CV= coeficiente de variación. AP= altura de planta en cm, CL1= contenido antes de llenado de grano, CL2 = contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano, TD = temperatura del dosel, DE= días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE= número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos en g, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en g m<sup>-2</sup>, EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, PHL = peso hectolítrico en kg hL<sup>-1</sup>, RG = rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, \* indica significancia a P=0.05. GL=grados de libertad.

## 4.7 Análisis de componentes principales

La variabilidad del conjunto de datos es esencialmente explicada por el componente 1 tanto en forma global, por localidad, y por ambiente; la variable que tiene fuerte relación con el primer componente principal es GPMC y podría decirse que este componente representa la producción de materia seca en términos de número de granos por superficie. Las variables que tienen más relación con el segundo componente son RG y BIO (Cuadro 26).

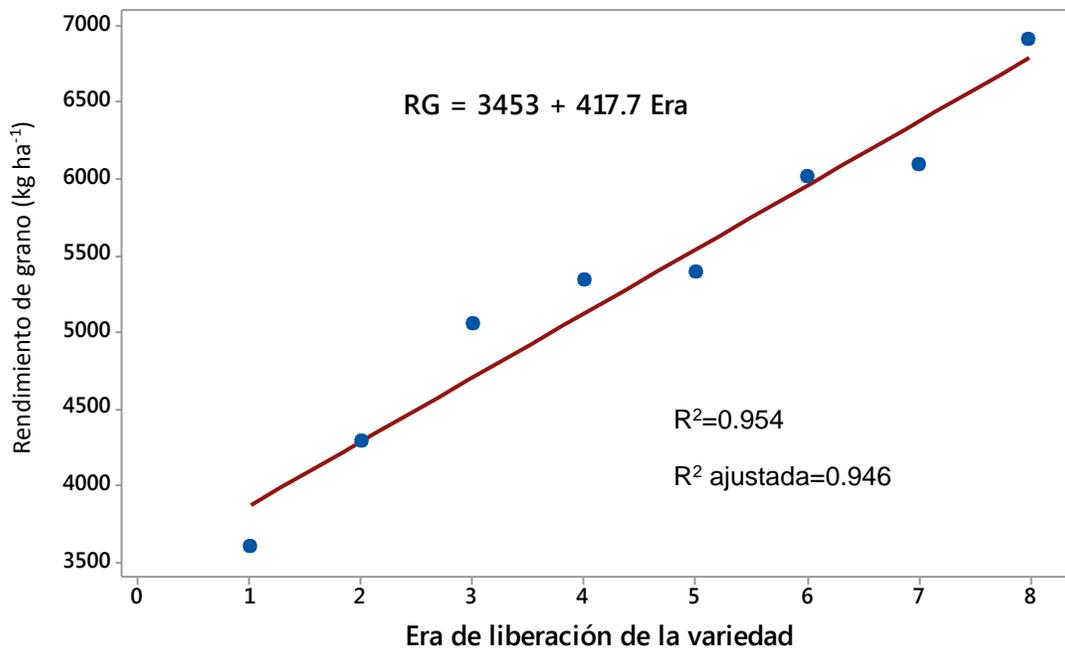
**Cuadro 26. Componentes principales: global, por localidad, y por ambientes.**

<b>Global</b>		<b>Eigenvectores</b>							
Eigen- valores	Acumulada	PMG	EPMC	RG	TLLG	BIO	GPMC	IC	PHL
1	0.9538	6.85x10 <sup>-4</sup>	1.52x10 <sup>-3</sup>	0.40	6.65x10 <sup>-3</sup>	0.24	0.88	6.00x10 <sup>-6</sup>	3.69x10 <sup>-4</sup>
2	0.9884	5.80x10 <sup>-3</sup>	1.17x10 <sup>-4</sup>	0.74	8.01x10 <sup>-3</sup>	0.48	-0.47	9.00x10 <sup>-6</sup>	6.53x10 <sup>-4</sup>
<b>Por localidad</b>					<b>Celaya</b>				
1	0.9285	1.13x10 <sup>-3</sup>	9.91x10 <sup>-4</sup>	0.42	7.38x10 <sup>-3</sup>	0.24	0.87	1.10x10 <sup>-5</sup>	8.02x10 <sup>-4</sup>
2	0.9840	5.41x10 <sup>-3</sup>	1.40x10 <sup>-3</sup>	0.66	7.34x10 <sup>-3</sup>	0.58	-0.47	6.00x10 <sup>-6</sup>	8.08x10 <sup>-3</sup>
					<b>Montecillo</b>				
1	0.9512	1.30x10 <sup>-4</sup>	1.20x10 <sup>-3</sup>	0.36	6.32x10 <sup>-3</sup>	0.23	0.90	2.00x10 <sup>-6</sup>	1.40x10 <sup>-4</sup>
2	0.9867	5.49x10 <sup>-3</sup>	-2.2x10 <sup>-3</sup>	0.80	9.02x10 <sup>-3</sup>	0.88	-0.43	1.60x10 <sup>-5</sup>	2.81x10 <sup>-4</sup>
<b>Por ambiente</b>					<b>Celaya, primera fecha siembra</b>				
1	0.8871	9.93x10 <sup>-4</sup>	2.21x10 <sup>-4</sup>	0.44	7.94x10 <sup>-3</sup>	0.20	0.88	1.30x10 <sup>-5</sup>	4.65x10 <sup>-4</sup>
2	0.9741	5.92x10 <sup>-3</sup>	9.31x10 <sup>-4</sup>	0.75	1.54x10 <sup>-2</sup>	0.45	-0.48	1.50x10 <sup>-5</sup>	4.37x10 <sup>-4</sup>
					<b>Montecillo, primera fecha de siembra</b>				
1	0.9610	2.00x10 <sup>-5</sup>	1.41x10 <sup>-3</sup>	0.34	5.68x10 <sup>-3</sup>	0.23	0.91	2.00x10 <sup>-6</sup>	9.90x10 <sup>-5</sup>
2	0.9880	5.67x10 <sup>-3</sup>	-4.0x10 <sup>-3</sup>	0.84	1.04x10 <sup>-2</sup>	0.36	-0.41	2.20x10 <sup>-5</sup>	6.10x10 <sup>-4</sup>
					<b>Celaya, segunda fecha de siembra</b>				
1	0.9542	7.17x10 <sup>-4</sup>	1.35x10 <sup>-3</sup>	0.34	8.93x10 <sup>-3</sup>	0.17	0.92	1.40x10 <sup>-5</sup>	8.40x10 <sup>-3</sup>
2	0.9881	5.96x10 <sup>-3</sup>	2.89x10 <sup>-3</sup>	0.64	1.25x10 <sup>-2</sup>	0.68	-0.36	-1.7x10 <sup>-5</sup>	1.34x10 <sup>-3</sup>
					<b>Montecillo, segunda fecha de siembra</b>				
1	0.9446	3.07x10 <sup>-4</sup>	9.49x10 <sup>-4</sup>	0.40	7.52x10 <sup>-3</sup>	0.22	0.89	4.00x10 <sup>-6</sup>	2.18x10 <sup>-4</sup>
2	0.9923	5.42x10 <sup>-3</sup>	-1.3x10 <sup>-3</sup>	0.78	8.21x10 <sup>-3</sup>	0.43	-0.45	1.40x10 <sup>-5</sup>	2.60x10 <sup>-5</sup>

PMG=peso de mil granos en g, EPMC= espigas por metro cuadrado, RG= rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, TLLG= tasa de llenado de grano en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, BIO= biomasa en g m<sup>-2</sup>, GPMC= granos por metro cuadrado, IC= índice de cosecha, PHL= peso hectolítrico en g hL<sup>-1</sup>.

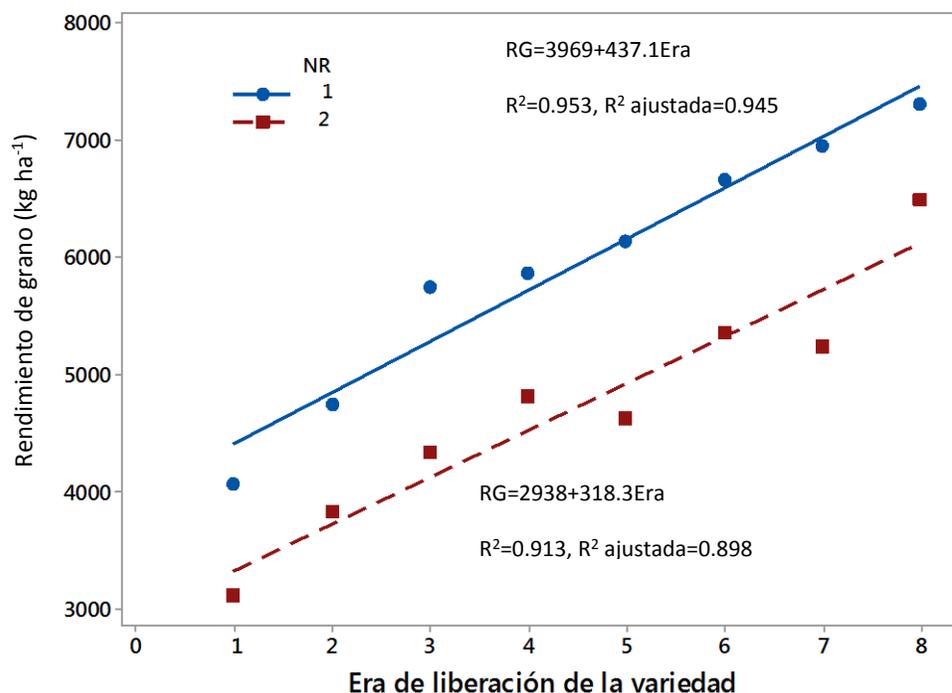
#### 4.8 Ganancia del rendimiento de grano

La ganancia genética del rendimiento de grano promedio de los cuatro experimentos fue de 1.21 % anual ( $41.77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ( $P < 0.001$ ) (Figura 8) que en 67 años y partiendo de las variedades liberadas en el año de 1948 representó un aumento acumulado de  $2.8 \text{ t ha}^{-1}$  (81 %).



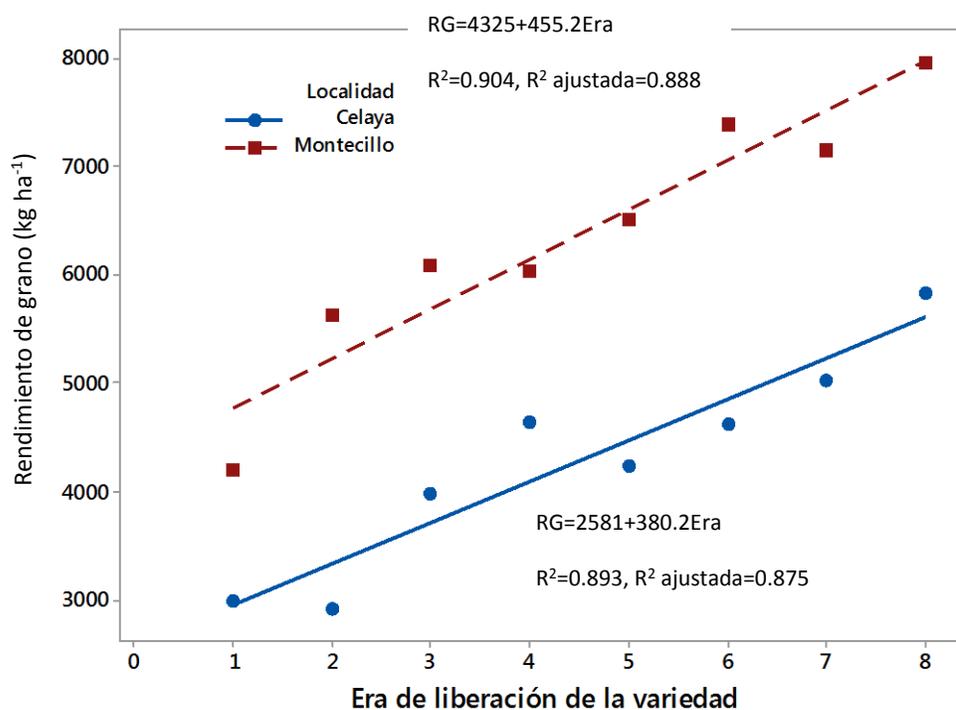
**Figura 8. Regresión lineal simple del rendimiento de grano sobre la eras de liberación de las variedades en promedio de los cuatro ambientes de evaluación. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5=1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

El progreso estimado del RG bajo riego normal (NR=1) fue de 1.10 % (43.71 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (P<0.001) *versus* una tasa anual de 1.35 % (39.82 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (P<0.001) bajo riego limitado (NR=2) (Figura 9).



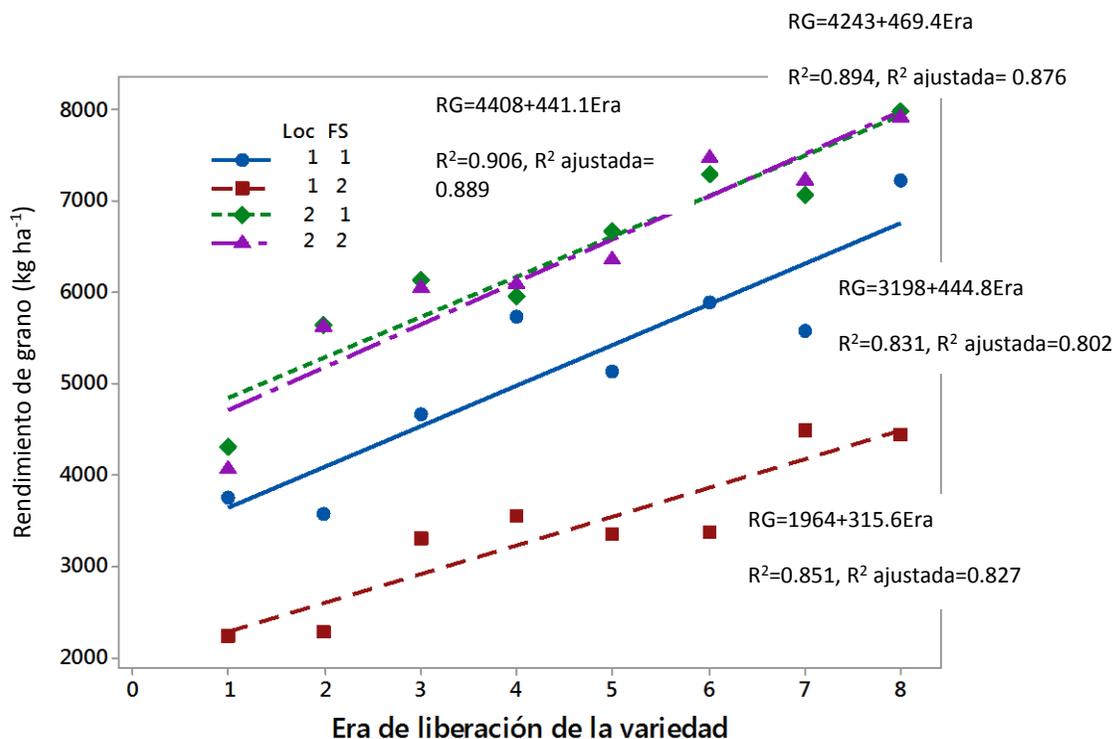
**Figura 9. Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano bajo riego normal=1 y limitado=2. NR= nivel de riego. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

En Celaya la ganancia anual fue 1.47 % (38.02 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (P<0.0001) mientras que en Montecillo fue estimado un progreso de 1.05 % (45.52 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (P<0.0001) (Figura 10).



**Figura 10. Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano en Celaya y Montecillo. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

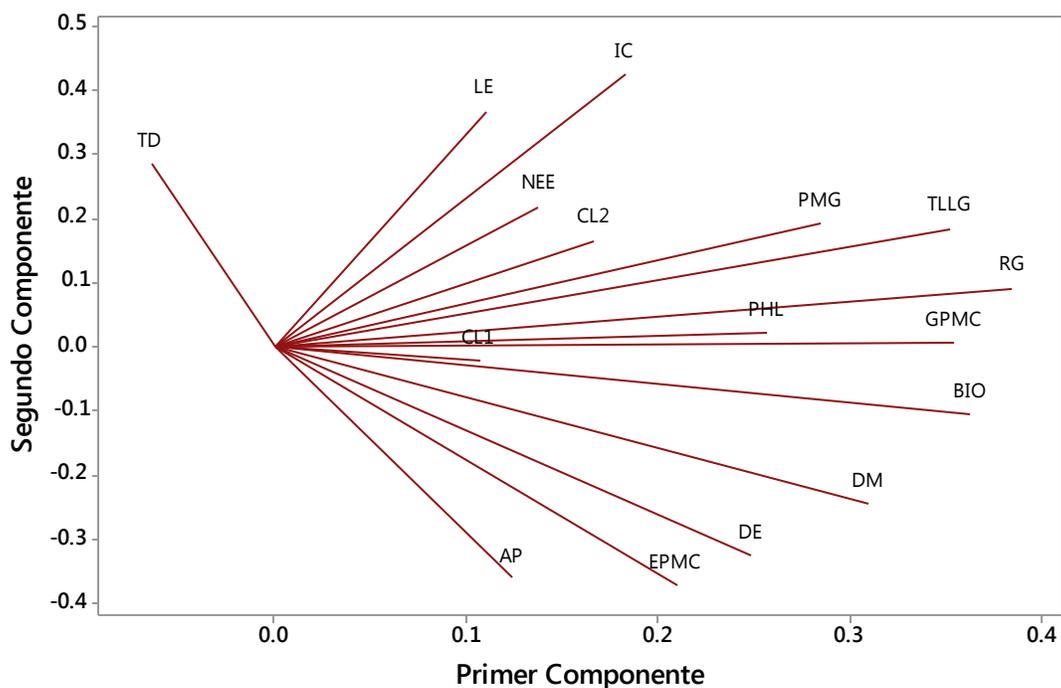
Para la primera fecha de siembra (FS=1) en Celaya fue calculada una ganancia en el rendimiento de 1.39 % ( $44.47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ( $P=0.002$ ) y para la segunda fecha (FS=2) de 1.61 % ( $31.56 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ( $P=0.001$ ). En Montecillo en la primera fecha de siembra la tasa anual de progreso fue 1.0 % ( $44.10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ( $R^2= 0.906$ ,  $P<0.0001$ ) y en la segunda fecha la tasa fue 1.1 % ( $46.94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ( $R^2= 0.894$ ,  $P<0.0001$ ) (Figura 11).



**Figura 11. Relación entre la era de liberación y el rendimiento de grano en las dos fechas de siembra (FS) de Celaya (Loc 1) y de Montecillo (Loc 2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

#### 4.9 Variables que ayudan a explicar el rendimiento de grano

Según la Figura 12, las variables más correlacionadas con RG fueron, lógicamente, los componentes del rendimiento: GPMC, TLLG, BIO, y PMG, mientras que las menos correlacionadas fueron AP y TD; sin tomar en cuenta en las regresiones por nivel de riego y localidad las variables componentes del rendimiento, CL2, DM, y LE contribuyen significativamente ( $P=0.025$ ) al rendimiento (Cuadros 27 y 28).



**Figura 12. Correlaciones entre las variables de estudio. AP = altura de planta, CL1 = contenido de clorofila antes de llenado de grano para Montecillo y contenido de clorofila en floración para Celaya, CL2 = contenido de clorofila en el periodo de llenado de grano para los ambientes 1, 3, y 4, y contenido de clorofila en espigamiento para el ambiente 2; TD = temperatura del dosel en ° C, DE = días a espigamiento, DM = días a madurez, LE = longitud de espiga en cm, NEE = número de espiguillas por espiga, PMG = peso de mil granos, IC = índice de cosecha, BIO = biomasa en  $\text{g m}^{-2}$ , EPMC = espigas por metro cuadrado, GPMC = granos por metro cuadrado, TLLG = tasa de llenado de grano, PHL = peso hectolítrico en  $\text{kg hL}^{-1}$ , RG = rendimiento de grano en  $\text{kg ha}^{-1}$ .**

**Cuadro 27. Regresión paso a paso para localidades.**

Término	Celaya		Montecillo	
	Coefficiente	Valor P	Coefficiente	Valor P
Constante	-19363	0.000	-21901	0.000
CL2	87.9	0.000	93.3	0.024
DM	130.7	0.000	141.3	0.000
LE	572	0.000	489	0.000
TD			42.4	0.065
R <sup>2</sup>	0.6482		0.6214	
R <sup>2</sup> ajustada	0.6302		0.5957	

**Cuadro 28. Regresión paso a paso para niveles de riego.**

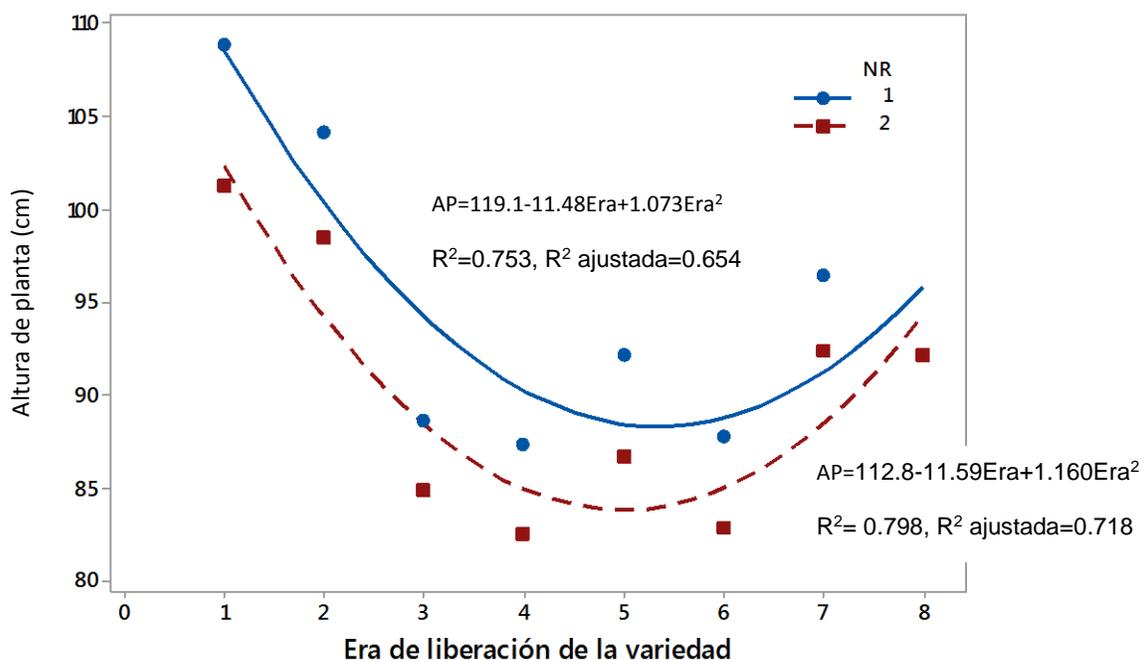
Término	Riego normal		Riego limitado	
	Coefficiente	Valor P	Coefficiente	Valor P
Constante	-15673	0.000	-15604	0.000
CL2	80.0	0.000	71.8	0.000
DM	95.1	0.000	104.7	0.000
LE	681	0.000	526	0.000
R <sup>2</sup>	0.7463		0.6367	
R <sup>2</sup> ajustada	0.7337		0.6185	

#### **4.10 Caracteres fisiotécnicos del trigo a través de las eras**

La tendencia general de la investigación es que los niveles de riego tuvieron un efecto diferente sobre las variables estudiadas por lo que es de esperar que el comportamiento de éstas cambie a través de las eras de acuerdo al nivel de riego.

La Figura 13 muestra una tendencia del comportamiento de la altura de planta según la cual en los años 40 las plantas eran altas. Con la introducción de los genes del enanismo y la selección, la altura fue disminuyendo hasta un mínimo que corresponde a la década de los 80 a partir de la cual fue en aumento. La altura de planta bajo riego limitado es menor pero en las últimas décadas tiende a acercarse a la altura bajo riego

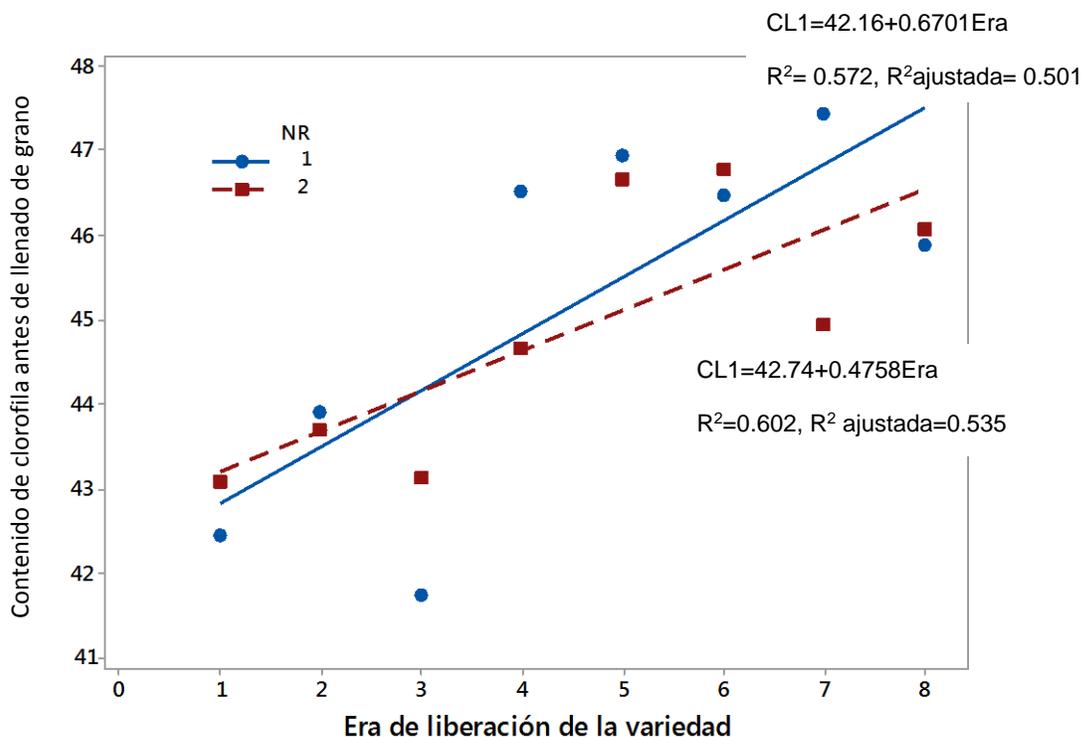
normal. La ecuación de AP bajo riego normal tiene una significancia  $P=0.03$  y bajo riego limitado es  $P=0.018$ .



**Figura 13. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la altura de planta. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

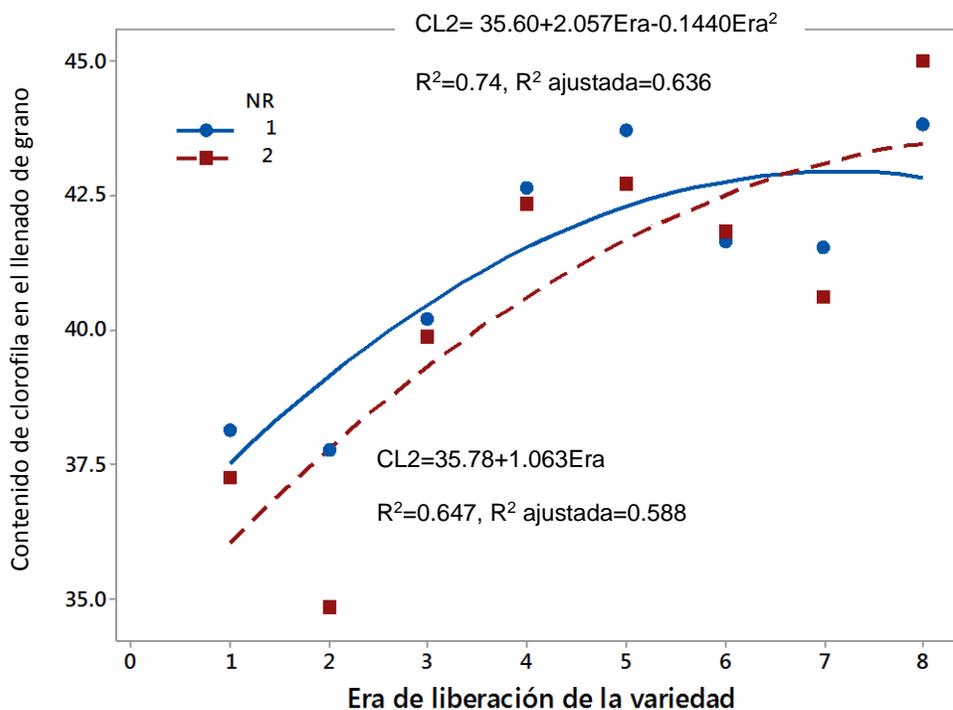
El contenido de clorofila, tomado antes del llenado de grano, bajo riego normal ha ido en aumento a través de las eras y bajo riego limitado se observa que al inicio fue incluso mayor que bajo riego normal y en las últimas décadas tiende a aumentar menos que bajo riego normal. La relación entre la era y el contenido de clorofila bajo riego normal

no es tan fuerte y tiene la siguiente significancia  $P=0.03$  y bajo riego limitado es  $P=0.024$  (Figura 14).



**Figura 14. Relación lineal ajustada entre la era de liberación y el contenido de clorofila antes del llenado de grano. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

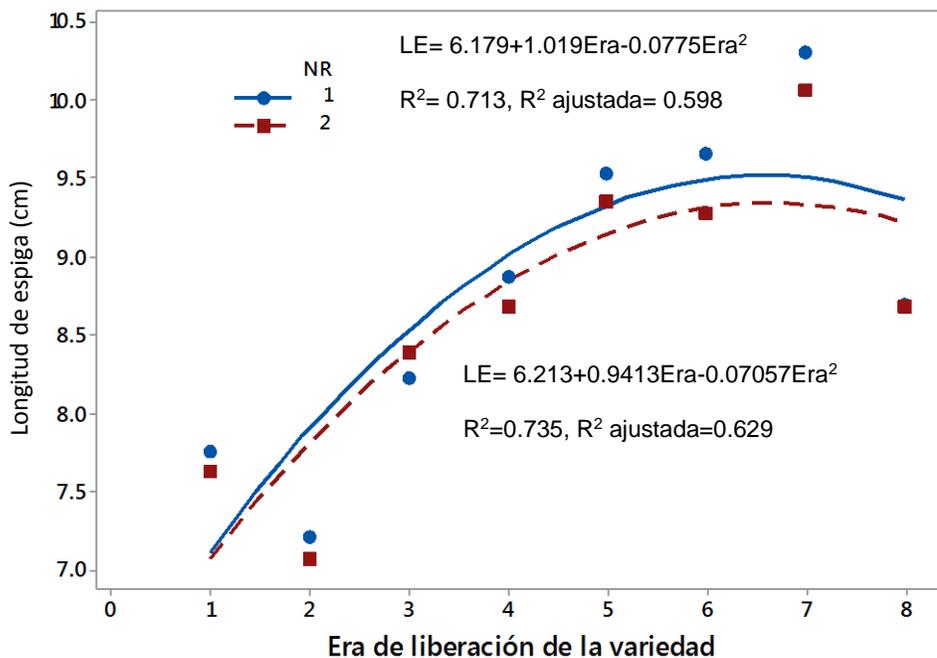
En el caso del contenido de clorofila tomado en el periodo de llenado de grano para los ambientes 1, 3 y 4 y en floración para el ambiente 2, la tendencia nos indica un aumento continuo hasta la era 7 para el caso de la condición irrigada. En esa misma era el contenido de clorofila bajo déficit hídrico logra superar al de la condición irrigada (Figura 15) cuya significancia es  $P=0.034$  y bajo déficit hídrico es  $P=0.016$ .



**Figura 15. Relación cuadrática bajo riego normal, y lineal bajo riego limitado entre la era de liberación y el contenido de clorofila en el llenado de grano. NR =nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

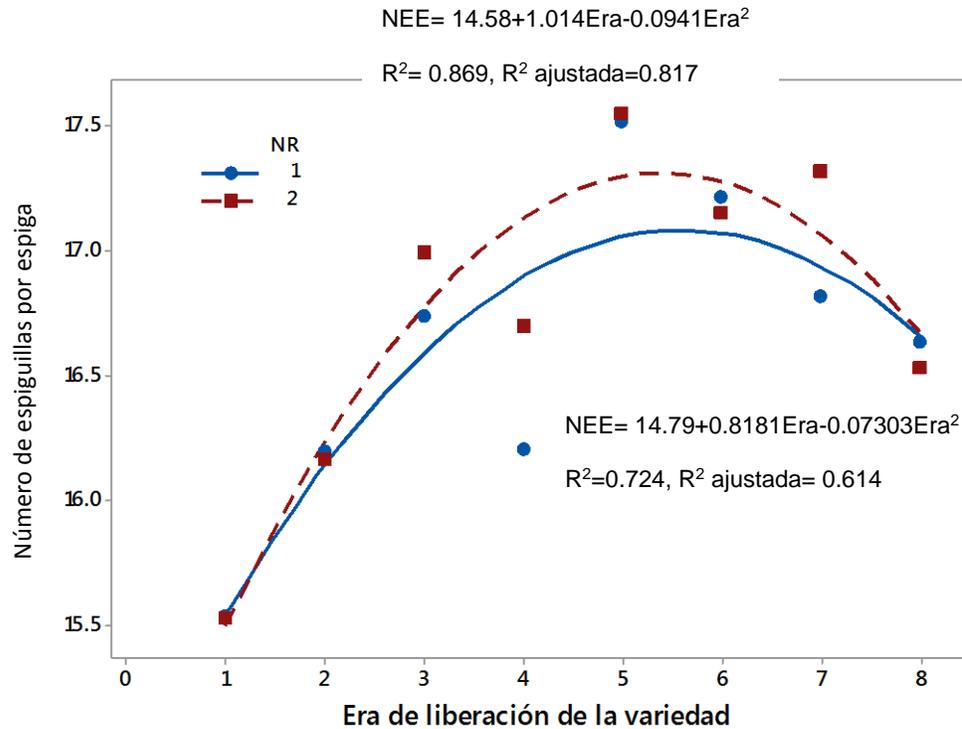
La temperatura del dosel, los días a espigamiento, los días a madurez, y el peso hectolítrico tienen un ajuste tan bajo que no es posible relacionarlos a través de las eras para explicar su contribución al rendimiento y a la resistencia al déficit hídrico del suelo.

La longitud de espiga ha ido en aumento tanto bajo riego normal ( $P=0.044$ ) como bajo riego limitado ( $P=0.036$ ) hasta los años 2000 en que empieza a declinar (Figura 16).



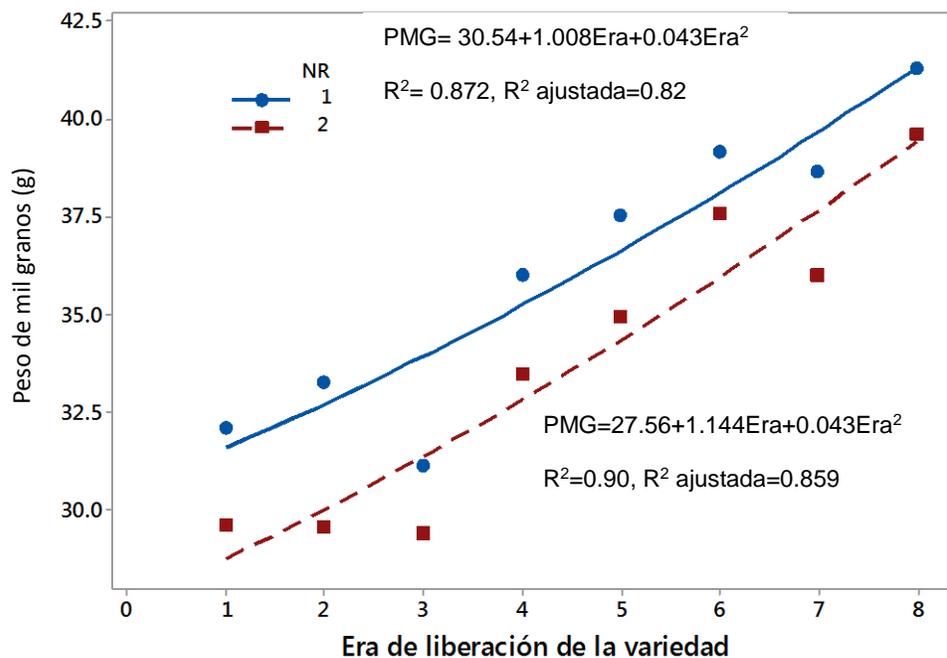
**Figura 16. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la longitud de espiga bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

De los años 40 a los 70 el número de espiguillas por espiga aumentó de 15.5 a 17.1 bajo riego normal ( $P=0.04$ ) y de 15.5 a 17.3 bajo riego limitado ( $P=0.006$ ) y a partir de los años 80 disminuyeron hasta que ahora parece que bajo riego normal y limitado el número de espiguillas es igual (Figura 17).



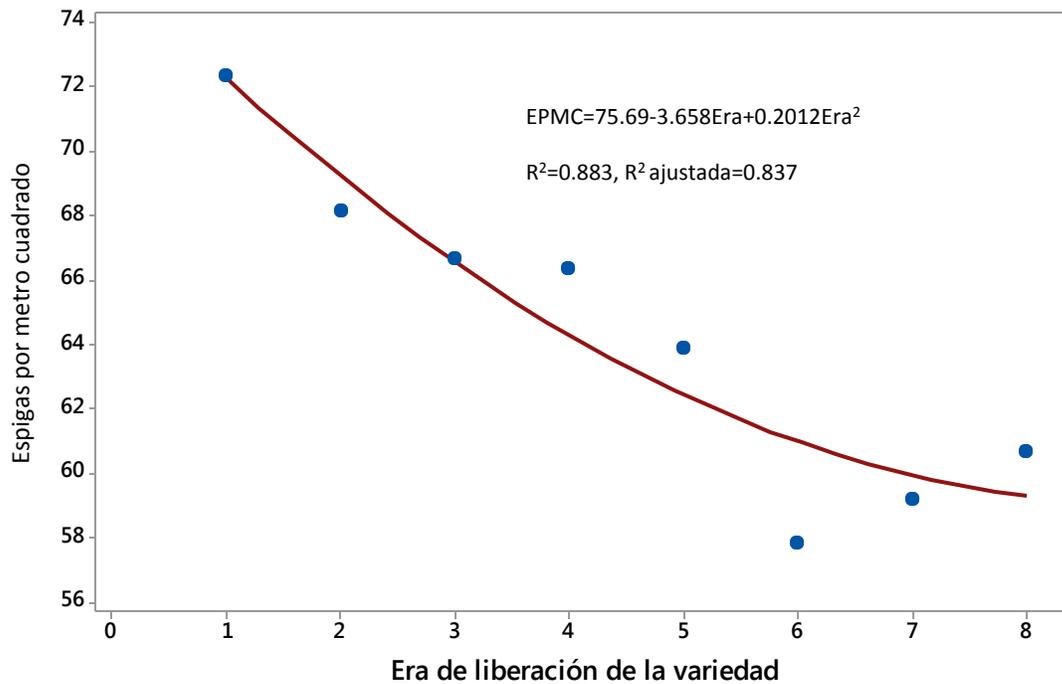
**Figura 17. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el número de espiguillas por espiga bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

En los dos niveles de riego el peso de mil granos ha aumentado a través de las eras pero bajo riego limitado ( $P=0.003$ ) el peso siempre ha sido más bajo que en riego normal ( $P=0.006$ ) aunque tiende ligeramente a acercarse a lo que se obtiene en riego normal (Figura 18).



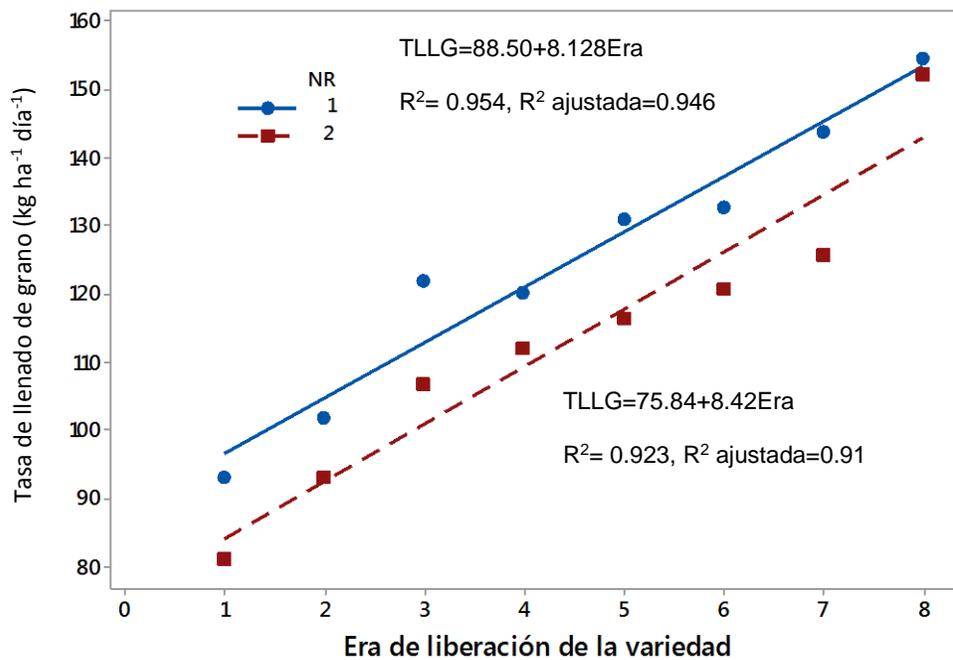
**Figura 18. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el peso de mil granos bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

El número de espigas por metro cuadrado bajo riego normal parece estar disminuyendo conforme pasan las eras ( $P=0.005$ ). Esta variable no tuvo un buen ajuste bajo riego limitado y por ello su regresión no se incluyó en la Figura 19.



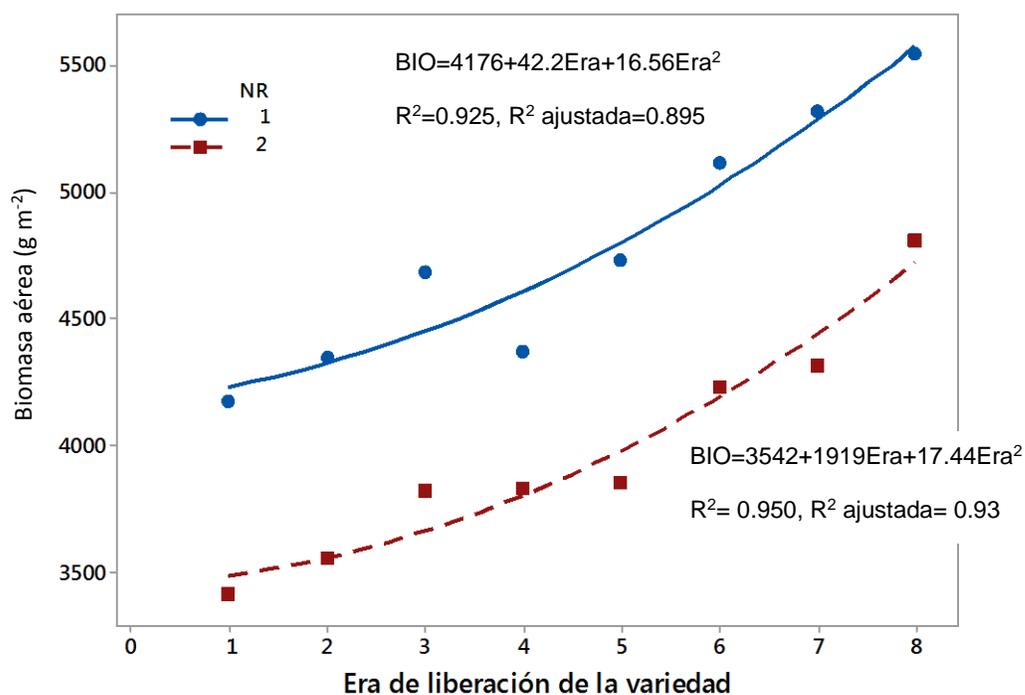
**Figura 19. Relación cuadrática (regresión polinomial) ajustada entre la era de liberación y el número de espigas por metro cuadrado bajo riego normal. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

La tasa de llenado de grano bajo riego normal ( $P < 0.001$ ) y bajo riego limitado ( $P < 0.001$ ) ha crecido a la par a través de las eras, siendo esta variable siempre menor en condición de déficit de humedad edáfica aunque tiende a acercarse en la última era a lo obtenido bajo riego normal (Figura 20).



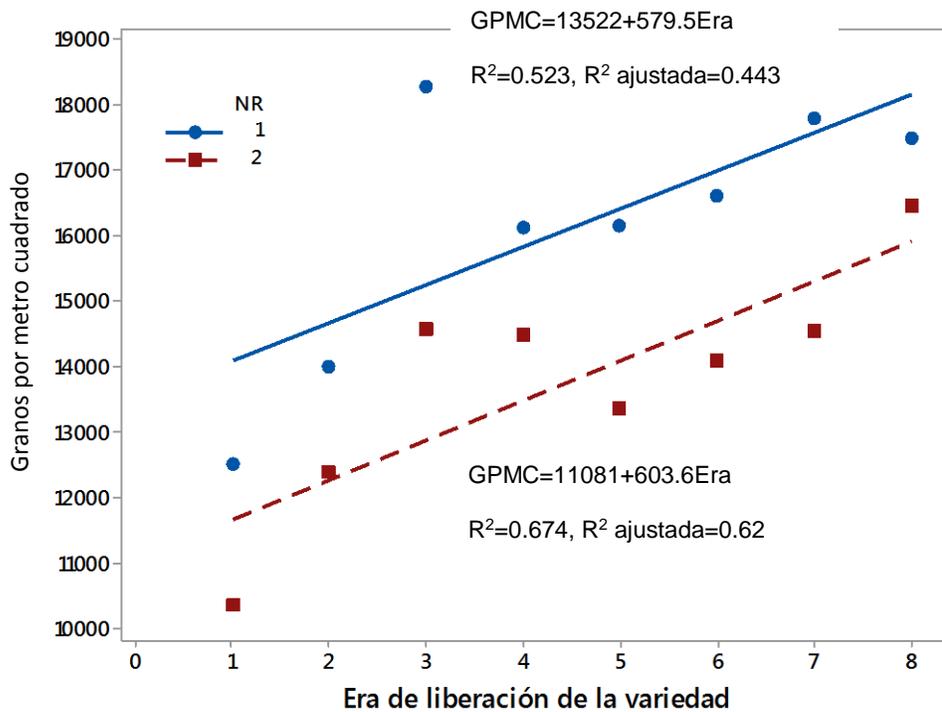
**Figura 20. Relación lineal ajustada entre la era de liberación y la tasa de llenado de grano bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

La biomasa aérea también ha aumentado a la par para riego normal ( $P=0.002$ ) y para riego limitado ( $P=0.001$ ) siendo para éste menor en cada era (Figura 21).



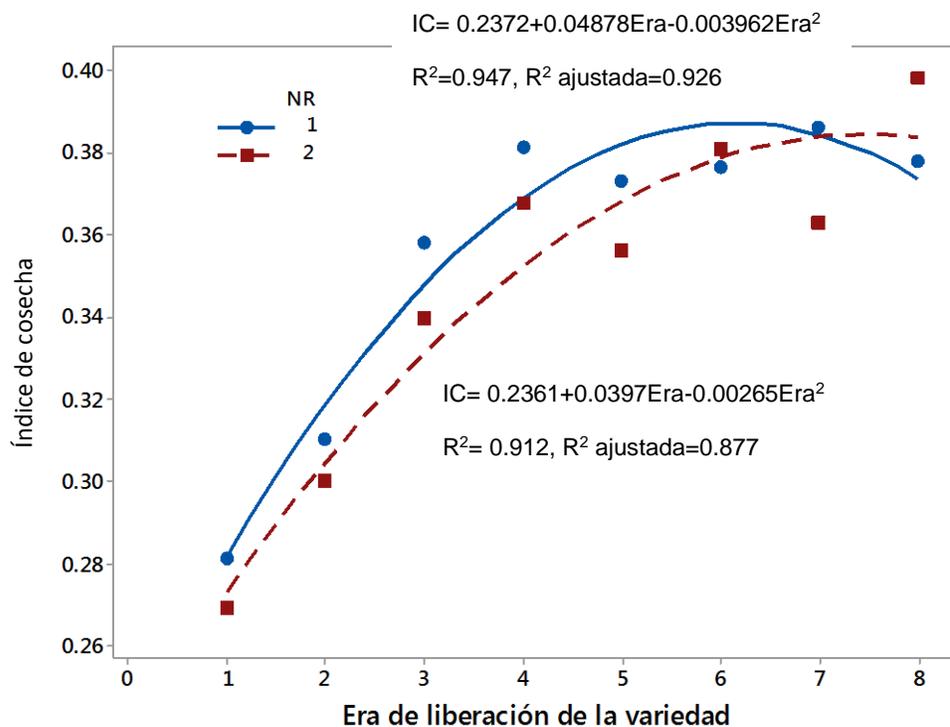
**Figura 21. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y la biomasa bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

El número de granos por metro cuadrado bajo riego normal ( $P=0.043$ ) y limitado ( $P=0.012$ ) parece estar aumentando a través del tiempo; en la última era las líneas de regresión de los dos niveles de riego tienden a acercarse (Figura 22).



**Figura 22. Relación lineal ajustada entre la era de liberación y el número de granos por metro cuadrado bajo riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

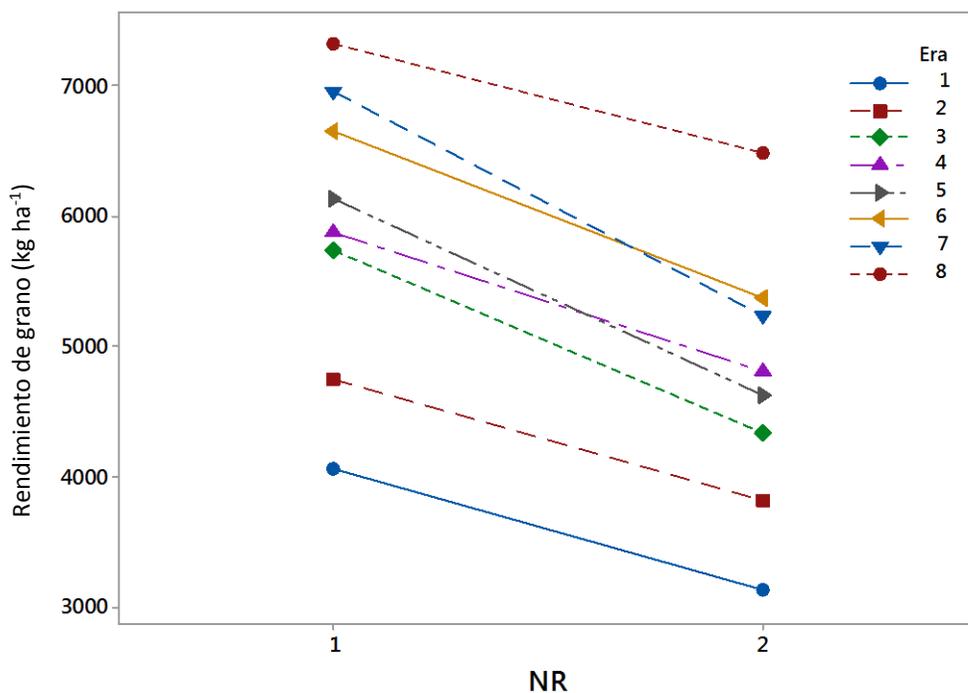
El índice de cosecha ha disminuido desde los años 90 bajo riego normal ( $P=0.001$ ) y bajo riego limitado ( $P=0.002$ ) en los años 2000; aparentemente ha llegado a un tope (Figura 23).



**Figura 23. Relación cuadrática ajustada entre la era de liberación y el índice de cosecha riego normal (1) y limitado (2). Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

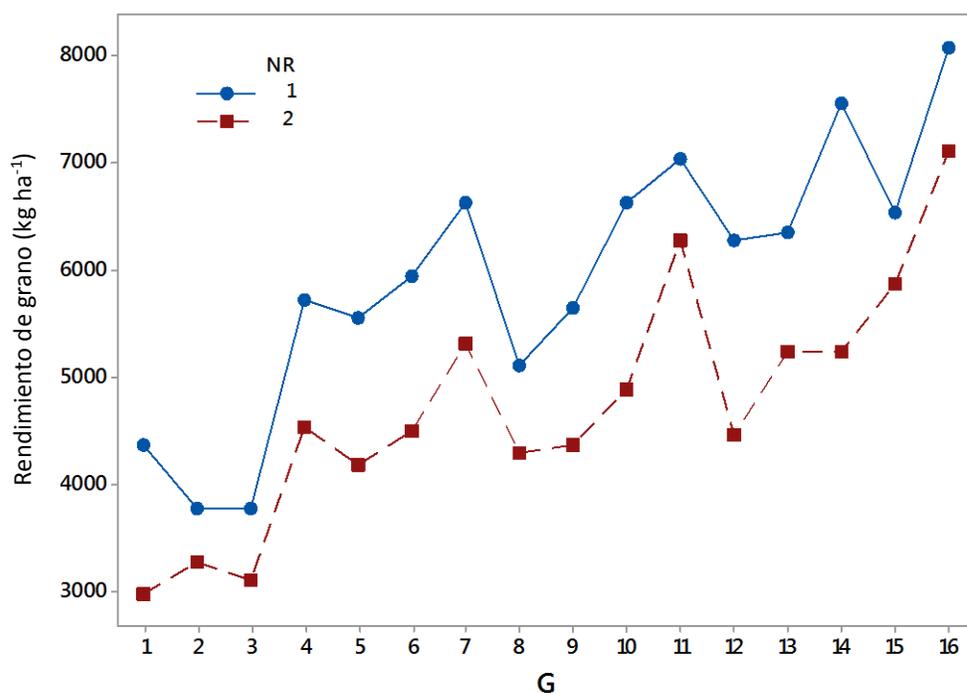
#### 4.11 Interacción era - genotipo por niveles de riego

En esta parte fueron consideradas tanto las eras, representadas por dos genotipos, como cada genotipo ya que hay variación dentro de cada era. Bajo riego normal las eras tienen un rendimiento consecutivamente mayor pero al pasar a riego limitado la era 5 cae debajo de la 4 y la era 7 debajo de la 6 (Figura 24).



**Figura 24. Interacción de las eras por niveles de riego (NR) sobre rendimiento de grano. NR: 1= riego normal, 2= riego limitado. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

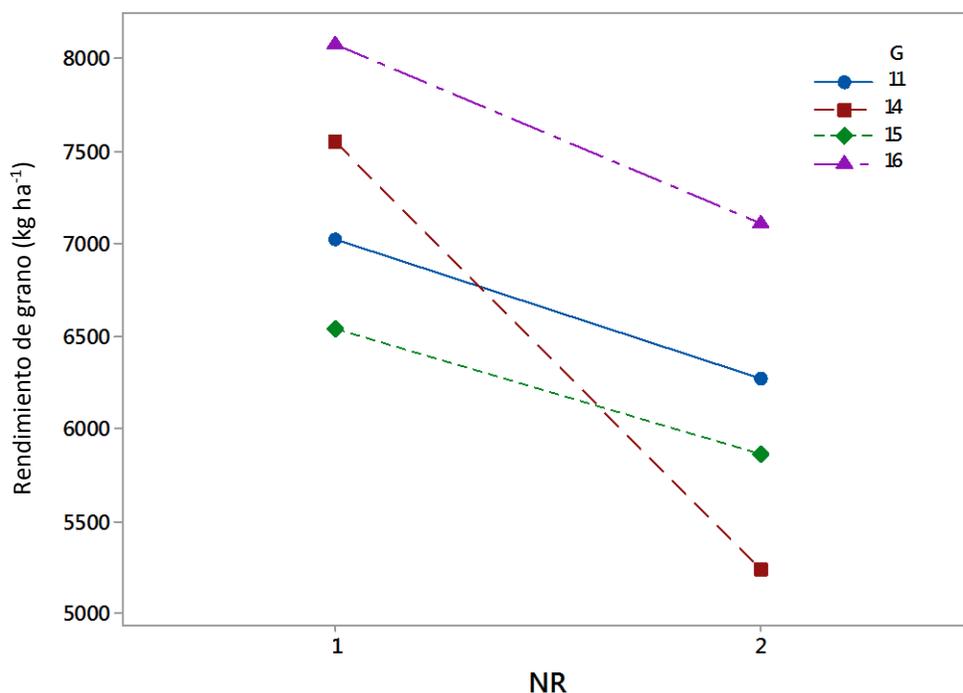
La Figura 25 muestra el rendimiento de grano promedio de cada genotipo tanto en riego normal como limitado. Los genotipos más recientes son más rendidores bajo riego normal pero no necesariamente lo son también bajo riego limitado. Llama la atención que en esta investigación ‘Chapingo 48’ (G=2) y ‘Yaktana 54C’ (G=3) tuvieran menos interacción con el contenido de humedad edáfica y que ‘Temporalera M87’ (G=10) bajara un 25 % aproximadamente su rendimiento en riego limitado.



**Figura 25. Interacción de los genotipos por niveles de riego sobre rendimiento de grano. NR= nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado, G= genotipo: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.**

‘Borlaug 100 F2014’ (G=16) fue sobresaliente tanto en riego normal como en riego limitado reduciendo su rendimiento sólo en 13 % aproximadamente en la última condición. ‘Baviacora M92’ (G=11) y ‘Bacorehuis F2015’ (G=15) tuvieron un buen desempeño en ambos niveles de riego disminuyendo su rendimiento en 11 %

aproximadamente bajo riego limitado. 'Nana F2007' (G=14) que es una variedad para siembras de temporal fue destacada en riego normal pero redujo su rendimiento en 31 % aproximadamente bajo riego limitado (Figura 26).

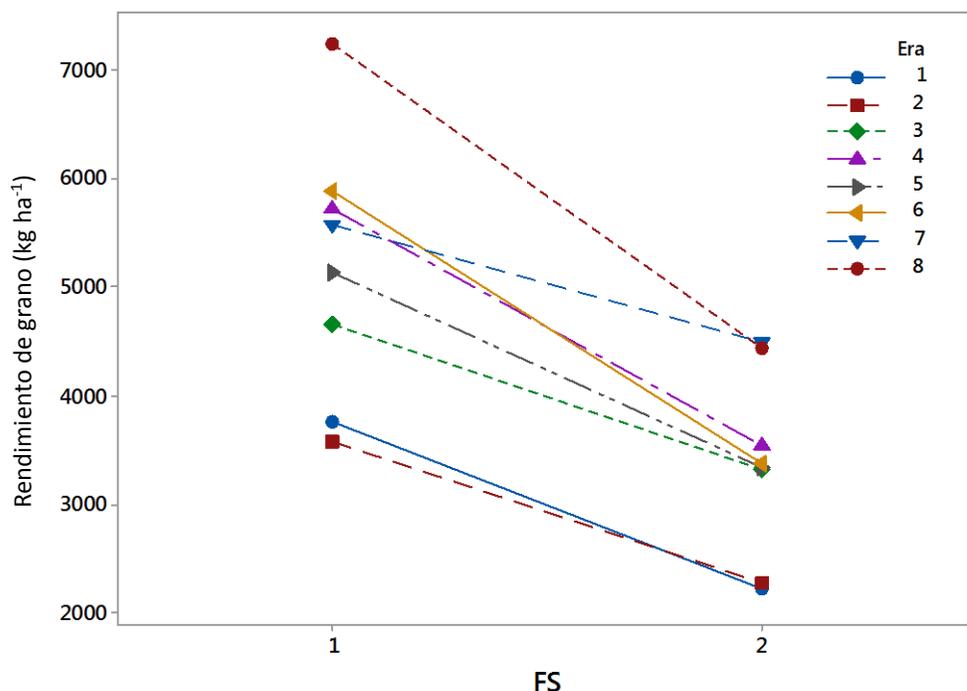


**Figura 26. Interacción entre 4 genotipos seleccionados y los niveles de riego sobre rendimiento de grano. NR= nivel de riego, 1= riego normal, 2= riego limitado, G= genotipos: 11=Baviacora M92, 14=Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16=Borlaug 100 F2014.**

#### **4.12 Interacción era - genotipo por fechas de siembra**

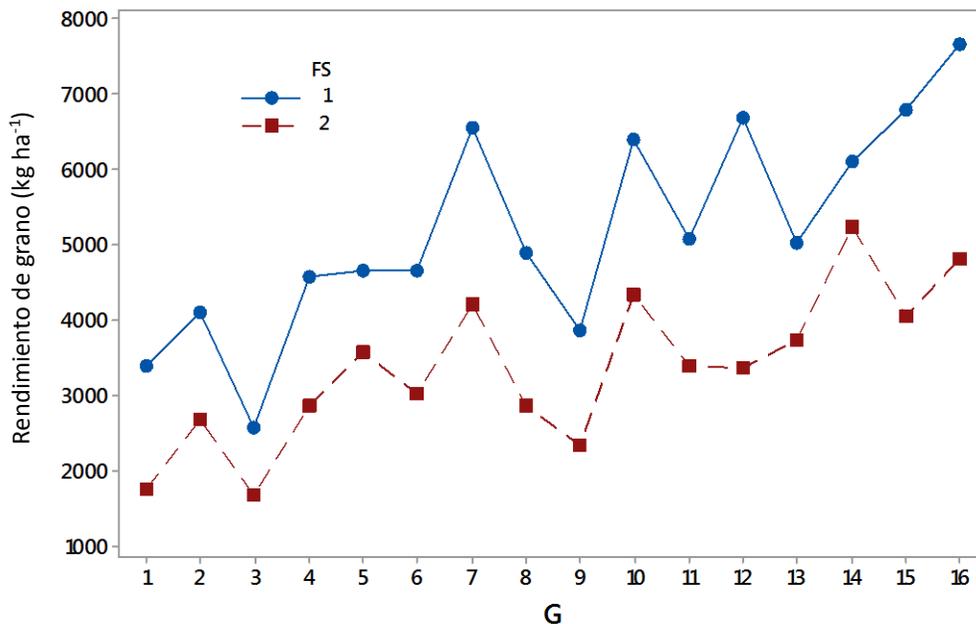
Las fechas de siembra, como ya se constató en el análisis de varianza, tienen una gran influencia en el rendimiento de las eras. Todas las eras bajaron su rendimiento en

la fecha de siembra 2 (tardía) en Celaya, sobre todo la era 6 y la era 8, manteniéndose menos variable la era 7 (Figura 27).



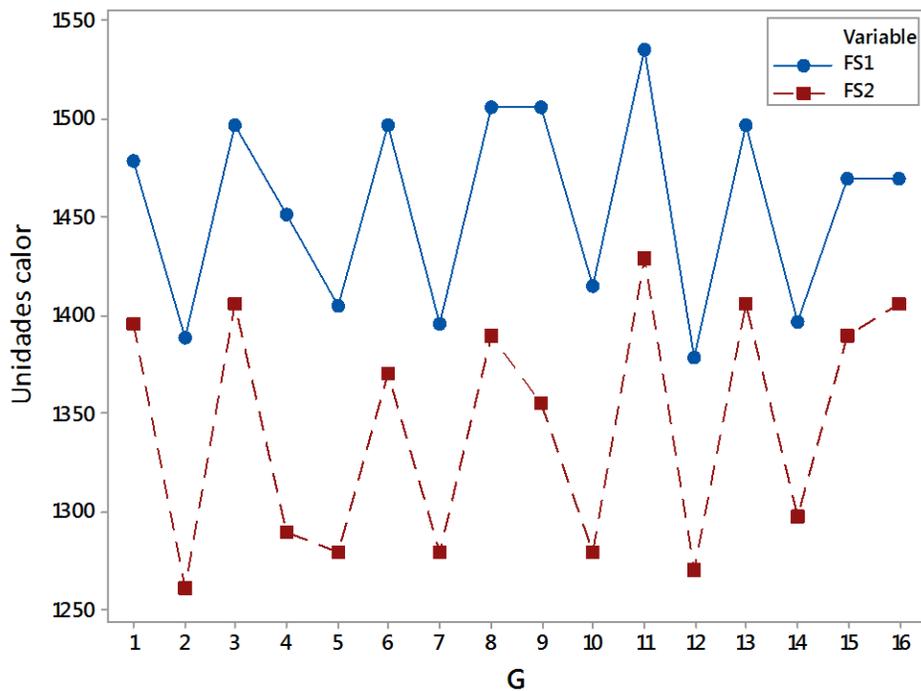
**Figura 27. Interacción entre eras y fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Celaya. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5=1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

En la segunda fecha de siembra en Celaya, ‘Borlaug 100 F2014’, ‘Bacorehuis F2015’, y ‘Cortázar S94’ fueron las variedades que más disminuyeron su rendimiento (36, 41.5, y 44 % respectivamente) mientras que ‘Nana F2007’, al contrario de lo que sucedió con los niveles de riego, disminuyó menos su rendimiento (14.5 % aproximadamente) respecto de la primera fecha de siembra (Figura 28).

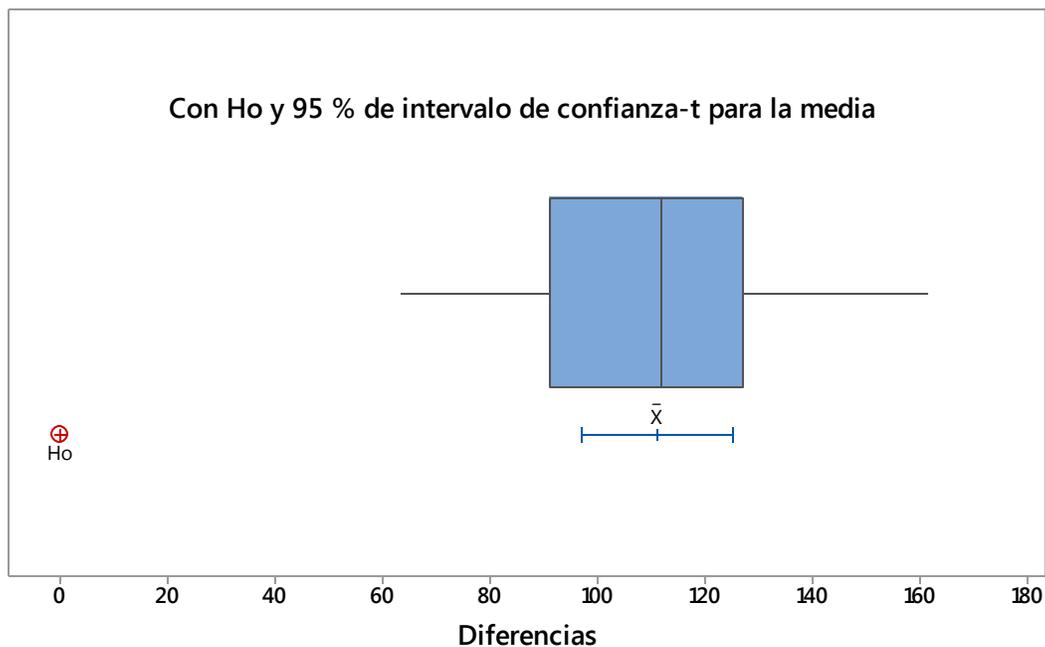


**Figura 28. Interacción de genotipos por fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Celaya. G= genotipos: 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.**

La disminución significativa del rendimiento de grano de los genotipos al pasar de la primera fecha de siembra a la segunda puede explicarse por las unidades calor acumuladas desde la siembra hasta la madurez. Las unidades calor que acumuló cada genotipo en la primera fecha de siembra fueron más que las acumuladas en la segunda fecha (Figura 29) y en promedio de los genotipos esta diferencia resultó significativa ( $P < 0.001$ ) (Figura 30).



**Figura 29. Unidades calor acumuladas de cada genotipo en la primera (FS1) y segunda fecha de siembra (FS2) en Celaya, Gto. 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.**



**Figura 30. Gráfica de caja de diferencias entre las unidades calor acumuladas por los genotipos en la primera y segunda fecha de siembra en Celaya, Gto.**

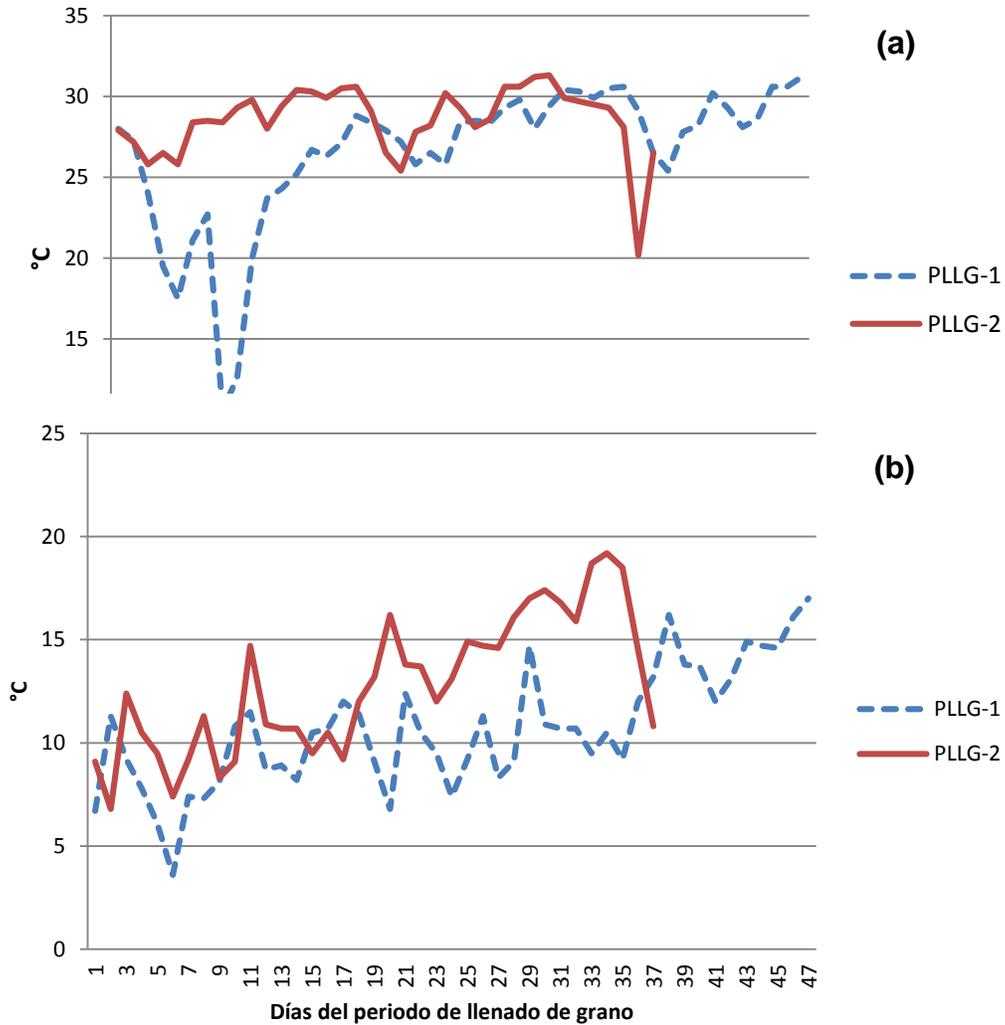
La diferencia entre las temperaturas máximas diarias que se presentaron en el periodo de llenado de la primera fecha de siembra y de la segunda fecha de siembra en Celaya explica el acortamiento de los días a madurez de los genotipos en la segunda fecha. También lo explica la diferencia de las temperaturas mínimas diarias entre las dos fechas de siembra en esta etapa fenológica, siendo para algunos genotipos la diferencia de las temperaturas mínimas mayor que la diferencia de las temperaturas máximas. El Cuadro 29 muestra la diferencia promedio de las temperaturas máximas y mínimas durante el periodo de llenado de grano. Esta diferencia nos indica que las temperaturas máximas y mínimas de la segunda fecha de siembra en promedio fueron mayores que las de la primera. Por ejemplo, para 'Bacorehuis F2015' en la segunda fecha de siembra

las temperaturas máximas fueron en promedio 2.72 °C mayores que las temperaturas máximas en la primera fecha de siembra; mientras que las temperaturas mínimas durante el llenado de grano de la segunda fecha de siembra fueron en promedio 3.18 °C mayores que las temperaturas mínimas en la primera fecha de siembra. Las Figuras 31 a) y b) muestran estas diferencias pero por día.

**Cuadro 29. Diferencia promedio en °C de las temperaturas máximas y mínimas entre las dos fechas de siembra de Celaya, Gto.**

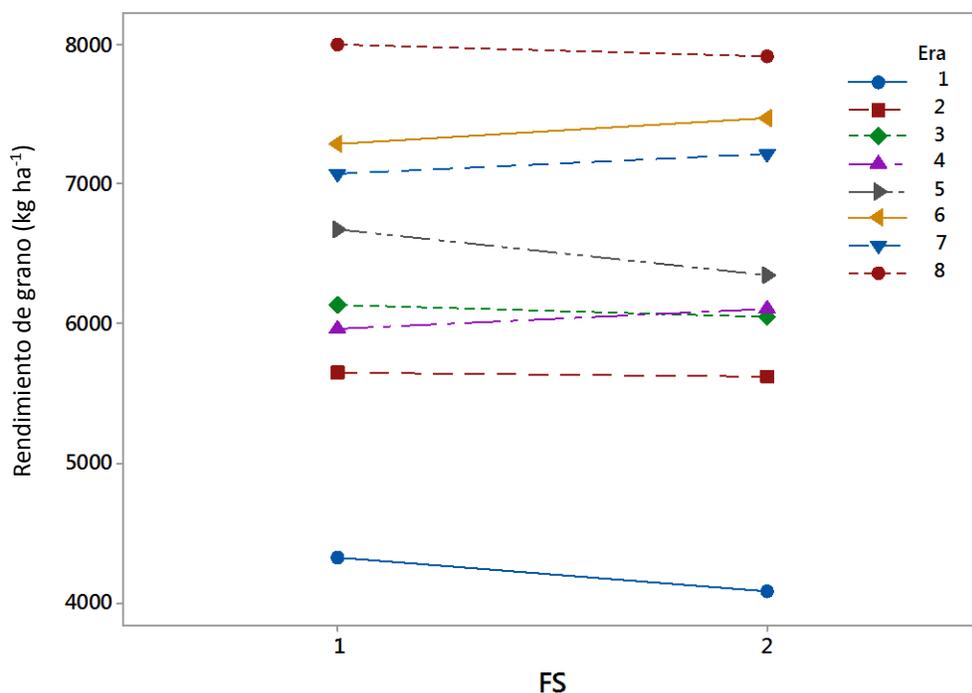
<b>Variedad</b>	<b>DTMAX</b>	<b>DTMIN</b>
Kentana 48	2.47	3.04
Chapingo 48	3.33	2.65
Yaktana 54C	3.02	3.65
Lerma Rojo	3.32	2.68
Lerma Rojo S64	3.00	2.69
Siete Cerros	2.87	3.47
Salamanca S75	3.26	3.07
Pavón F75	2.81	3.39
Seri M82	2.65	3.13
Temporalera M87	3.47	2.83
Baviacora M92	2.78	3.12
Cortázar S94	3.06	2.94
Roelfs F2007	2.95	3.69
Nana F2007	3.09	2.71
Bacorehuis F2015	2.72	3.18
Borlaug 100 F2014	2.73	3.34

DTMAX= diferencia entre las temperaturas máximas de la primera y la segunda fecha de siembra. DTMIN= diferencia entre las temperaturas mínimas de la primera y segunda fecha de siembra.



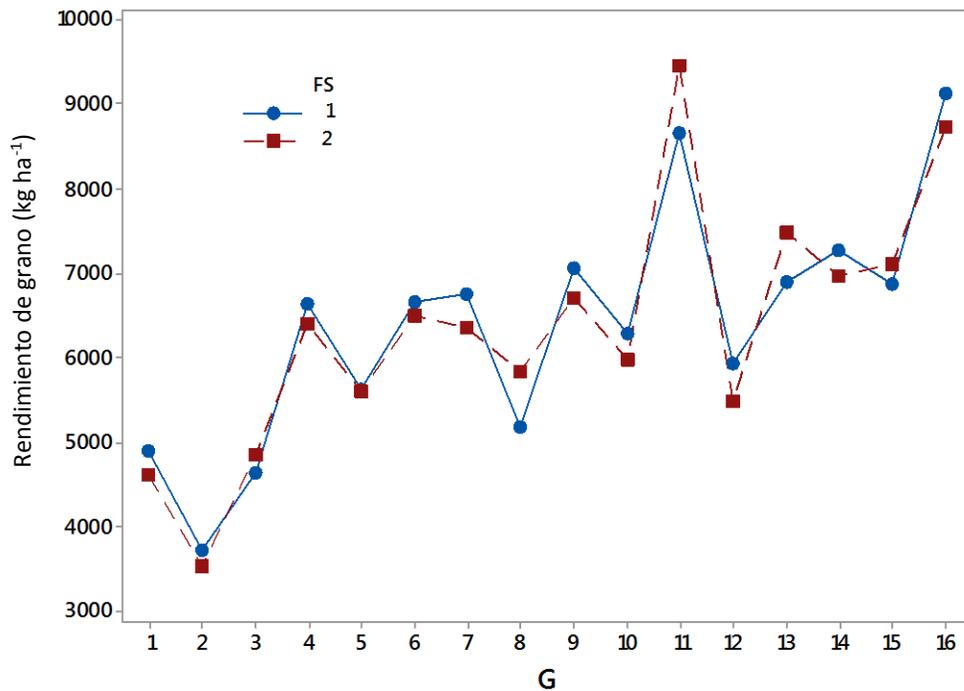
**Figura 31. a) Temperaturas máximas durante el periodo de llenado de grano de la variedad Bacorehuis F2015 en la primera fecha de siembra (PLLG-1) y segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Celaya. b) Temperaturas mínimas durante el periodo de llenado de grano de Bacorehuis F2015 en la primera fecha de siembra (PLLG-1) segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Celaya.**

En Montecillo no todas las eras disminuyeron su rendimiento al pasar de la primera fecha de siembra a la segunda, incluso las eras 4, 6, y 7 aumentaron su rendimiento en la segunda fecha (Figura 32).



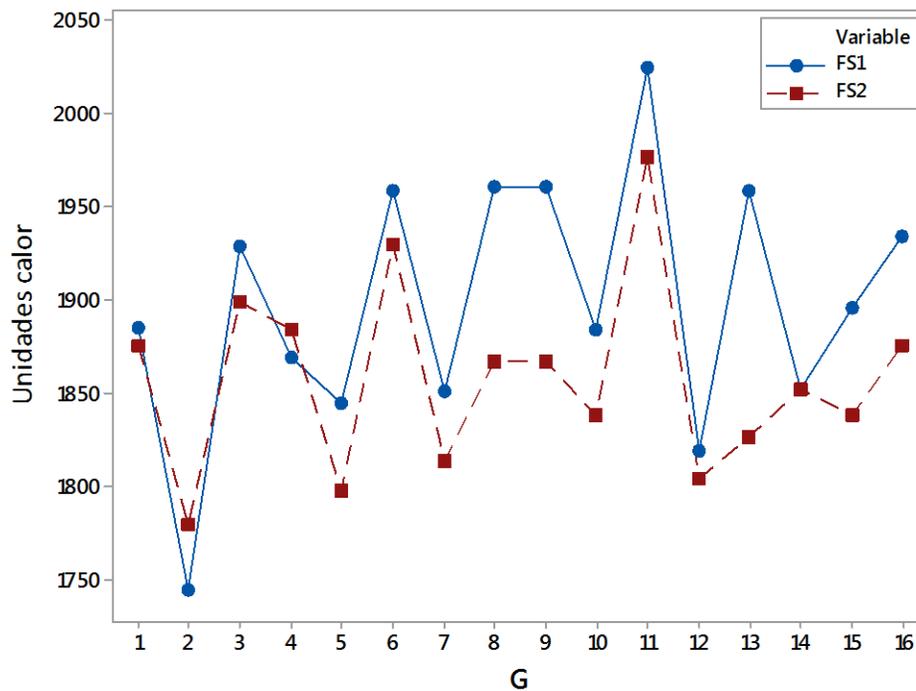
**Figura 32. Interacción entre eras y fechas de siembra (FS) en Montecillo por rendimiento de grano. Eras: 1=1941-1950, 2=1951-1960, 3=1961-1970, 4=1971-1980, 5 =1981-1990, 6=1991-2000, 7=2001-2010, 8=2011-2020.**

La Figura 33 muestra el comportamiento de cada uno de los genotipos en cada fecha de siembra en Montecillo respecto al rendimiento de grano. La diferencia entre el rendimiento de la primera y segunda fecha de siembra fue mayor para ‘Pavón F76’, ‘Baviacora M92’, y ‘Roelfs F2007’ los cuales, además, se comportaron mejor en la segunda fecha de siembra.

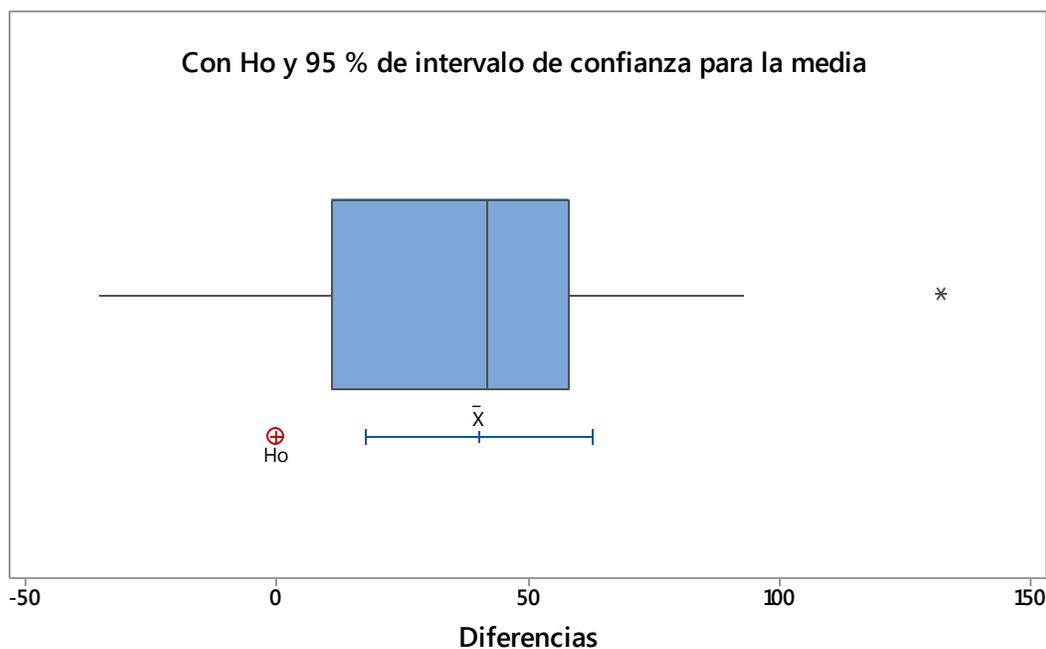


**Figura 33. Interacción genotipos por fechas de siembra (FS) sobre rendimiento de grano en Montecillo. G= genotipo, 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.**

Para Montecillo la diferencia entre las unidades calor acumuladas en la primera y segunda fecha de siembra es menor que la diferencia para Celaya. ‘Pavón F76’, ‘Seri M82’, y ‘Roelfs F2007’ destacan porque acumularon menos horas calor en la segunda fecha de siembra que el resto de los genotipos (Figura 34). La prueba de t pareada indica que en dicha localidad la diferencia entre las unidades calor en la primera y segunda fecha de siembra también fue significativa ( $P=0.002$ ) (Figura 35).



**Figura 34. Unidades calor acumuladas de cada genotipo en la primera (FS1) y segunda fecha de siembra (FS2) en Montecillo, Méx. 1= Kentana 48, 2= Chapingo 48, 3= Yaktana 54C, 4= Lerma Rojo, 5= Lerma Rojo S64, 6= Siete Cerros, 7= Salamanca S75, 8= Pavón F76, 9= Seri M82, 10= Temporalera M87, 11= Baviacora M92, 12= Cortázar S94, 13= Roelfs F2007, 14= Nana F2007, 15= Bacorehuis F2015, 16= Borlaug 100 F2014.**



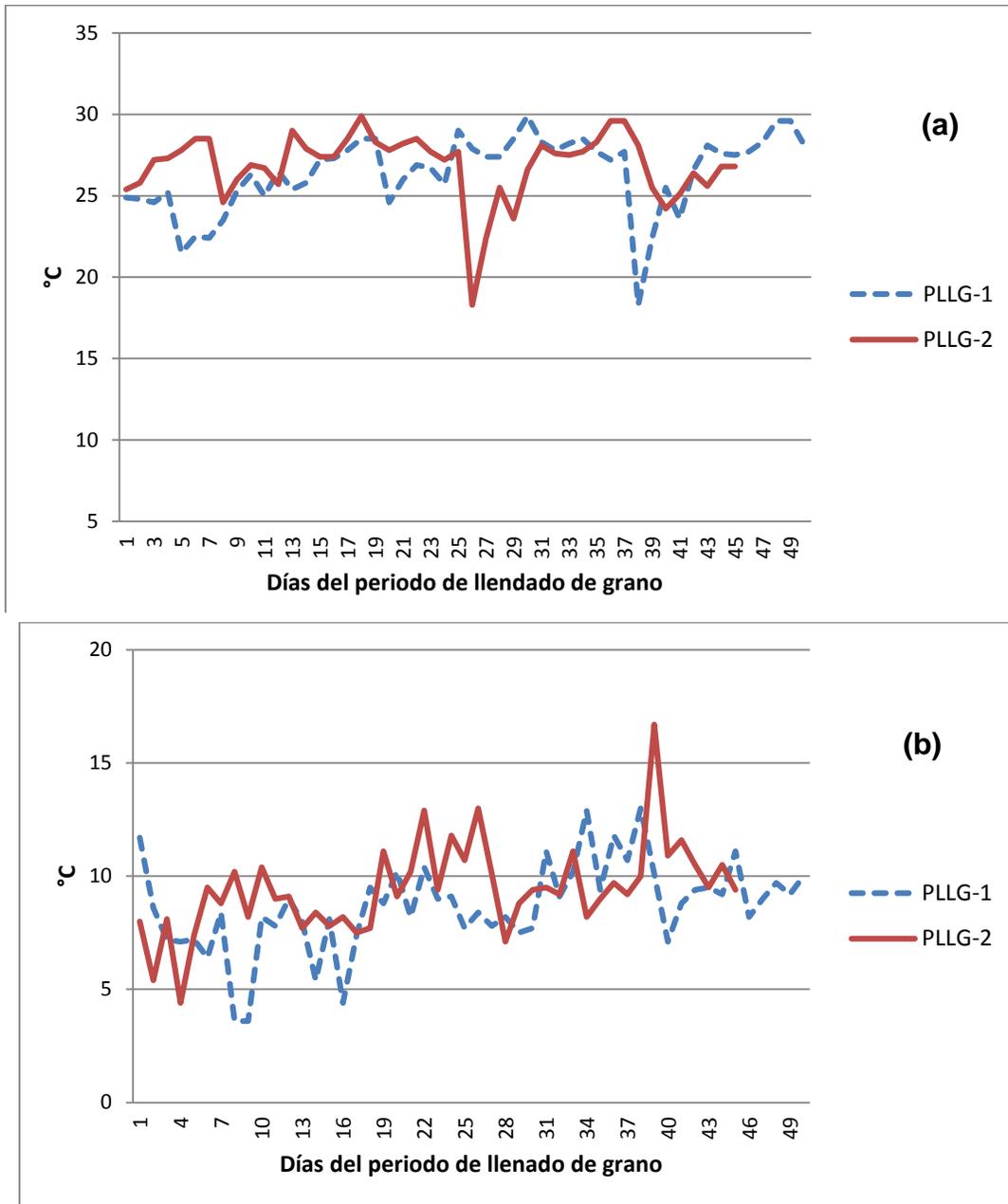
**Figura 35. Gráfica de caja de diferencias entre las unidades calor acumuladas por los genotipos en la primera y segunda fecha de siembra en Montecillo, Méx.**

En Montecillo, durante el periodo de llenado de grano la diferencia de las temperaturas máximas entre las dos fechas de siembra fue en promedio de 0.6 °C y de las temperaturas mínimas de 0.8 °C siendo más altas las de la segunda fecha. En la Figura 36 pueden apreciarse las diferencias diarias de la variedad ‘Bacorehuis F2015’ y en el Cuadro 30 se muestran las diferencias promedio entre temperaturas máximas de las dos fechas de siembra y entre temperaturas mínimas de las dos fechas de siembra para cada una de las variedades. En esta localidad la diferencia entre temperaturas mínimas es mayor que entre temperaturas máximas para 11 de 16 variedades.

**Cuadro 30. Diferencia promedio en °C de las temperaturas máximas y mínimas entre las dos fechas de siembra de Montecillo, Méx.**

<b>Variedad</b>	<b>DTMAX</b>	<b>DTMIN</b>
Kentana 48	0.5	1.0
Chapingo 48	0.9	0.7
Yaktana 54C	0.6	1.0
Lerma Rojo	0.7	1.0
Lerma Rojo S64	0.8	0.8
Siete Cerros	0.2	1.1
Salamanca S75	0.9	0.4
Pavón F75	0.5	1.0
Seri M82	0.4	1.0
Temporalera M87	0.7	0.8
Baviacora M92	0.1	0.8
Cortázar S94	0.9	0.4
Roelfs F2007	0.4	0.9
Nana F2007	0.9	0.7
Bacorehuis F2015	0.7	0.8
0.8Borlaug 100 F2014	0.6	0.8

DTMAX= diferencia entre las temperaturas máximas durante el periodo de llenado de grano de la primera y la segunda fecha de siembra. DTMIN= diferencia entre las temperaturas mínimas durante el periodo de llenado de grano de la primera y segunda fecha de siembra.



**Figura 36. a) Temperaturas máximas durante el periodo de llenado de grano de la variedad Bacorehuis F2015 de la primera (PLLG-1) y segunda fecha en Montecillo (PLLG-2). b) Temperaturas mínimas durante el periodo de llenado de grano de Bacorehuis F2015 de la primera (PLLG-1) y segunda fecha de siembra (PLLG-2) en Montecillo.**

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Influencia de la precipitación en el manejo del riego limitado

No obstante las abundantes lluvias, 167 mm acumulados más los riegos (Figura 1), que se presentaron en la localidad de Celaya antes de los 105 dds a ambas profundidades del suelo (Figuras 3) en la primera fecha de siembra, la humedad del suelo disminuyó a PMP y se mantuvo así hasta la cosecha. Es precisamente en esta región que durante el periodo de llenado de grano se suspende el último riego que representa una sequía terminal. Los mejoradores en El Bajío actualmente desarrollan variedades a las cuales se les pueda limitar los riegos a 3 o 2 (Solís *et al.*, 2013). Es decir, en este experimento se recrean las condiciones propias en que se encuentra la producción de trigo en El Bajío y en las otras áreas productoras de riego.

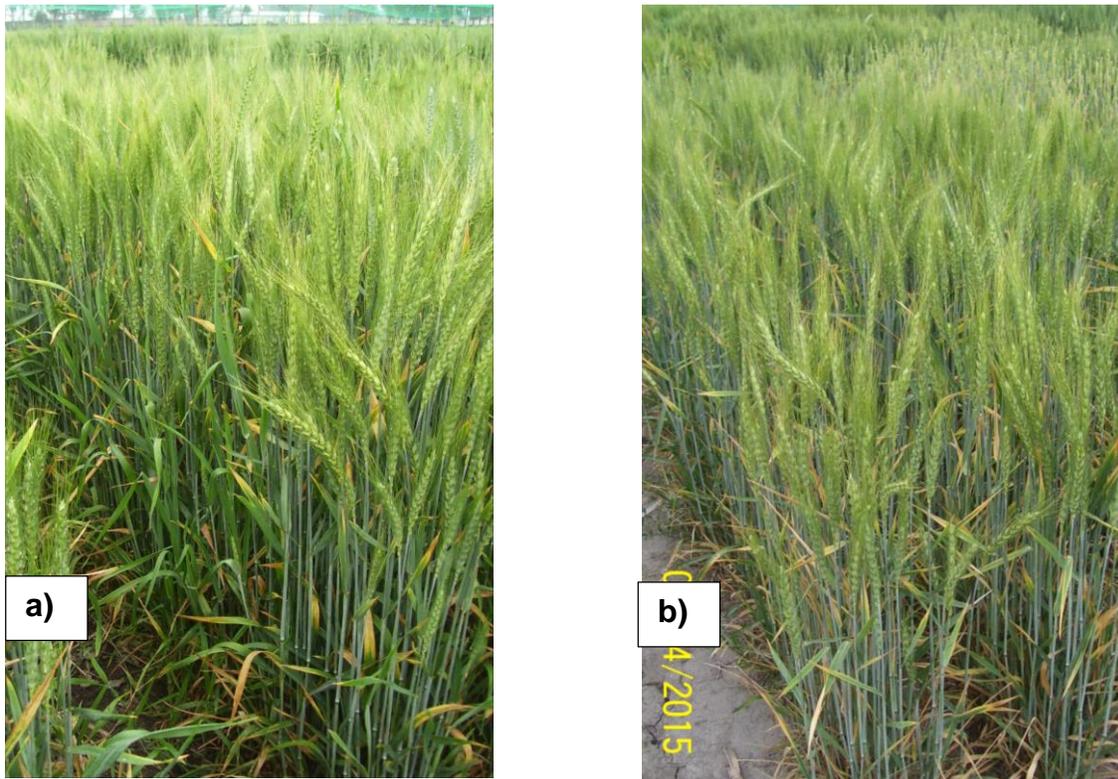
En esta localidad y para la segunda fecha de siembra el PMP ocurrió alrededor de los 83 dds justo en floración y periodo de llenado de grano de la mayoría de los genotipos y éste se mantuvo hasta la cosecha, a pesar de una precipitación acumulada posterior de 20.6 mm (Figura 4). Es decir, el déficit de humedad en la segunda fecha de siembra duró aproximadamente 10 días más que en la primera.

A diferencia de Celaya donde la humedad aprovechable es 13.4 %, en Montecillo es solamente de 6.1 %, esta diferencia es debida al mayor contenido de arcilla del suelo de Celaya y a la sodicidad del suelo de Montecillo lo que obligó a aplicar un mayor número de riegos en esta última localidad. La mayor proporción de agua que las variedades en Celaya podían extraer de la matriz del suelo hizo que éstas no presentaran síntomas de marchitez notorios bajo riego limitado. La condición atípica de lluvias que

acumuló en esta localidad 167 mm durante el periodo de cultivo realmente no afectó el propósito de esta investigación de medir el efecto de la suspensión del riego en el periodo de llenado de grano en la producción de grano de las variedades, al presentarse el mayor volumen de precipitación previo al llenado de grano.

Para la primera fecha de siembra en Montecillo, el riego fue suspendido el 15 de enero; posteriormente la lluvia y la menor retención de humedad del suelo provocaron variaciones de humedad edáfica muy pronunciadas a una profundidad de 0 a 10 cm. Desde los 33 a los 75 dds, luego de los 100 a los 127 dds, y de los 135 a los 144 las variedades estuvieron en PMP. Tales lapsos coincidieron con la etapa vegetativa antes del espigamiento, parte del llenado de grano, y parte de la madurez fisiológica (Figura 5). A una profundidad de 10 a 30 cm. las variaciones en el contenido de humedad no fueron tan pronunciadas, manteniéndose en PMP desde los 37 dds hasta los 144 dds

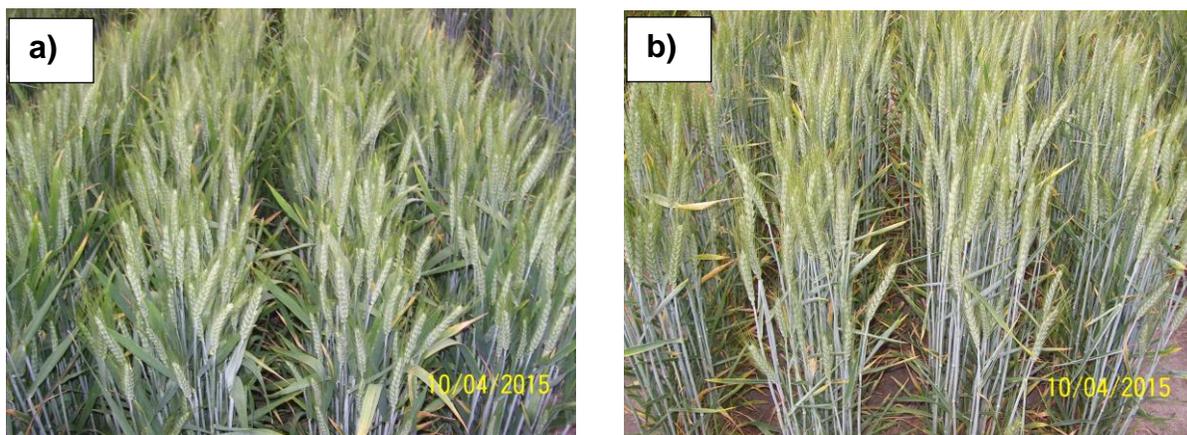
El riego limitado se tradujo en una sequía moderada que en campo causó diferencias entre plantas de la misma variedad, por ejemplo la Figura 36a muestra a la variedad Nana F2007 bajo riego normal el día 9 de abril cuyas hojas están extendidas por lo que se ven anchas, en cambio la misma variedad bajo riego limitado (Figura 36b) tiene las hojas acucharadas o enrolladas.



**Figura 36. Variedad Nana F2007 de la primera fecha de siembra en Montecillo, repetición 2. a) Bajo riego normal y b) limitado.**

Las parcelas bajo riego limitado de la segunda fecha de siembra en Montecillo fueron regadas por última vez el 9 de marzo (32 dds) y la humedad bajó a 33 % a los 43 días y no volvió a subir a 33 % hasta los 133 dds. Debido a las lluvias de marzo el contenido de humedad edáfica aumentó durante este mes a cerca de 30 % y de ahí en fuera estuvo incluso próximo a 21 %. La segunda parte del espigamiento y el periodo de llenado de grano coincidió con una humedad del suelo por abajo del 28 %. También en la segunda fecha de siembra pudieron ser observados los efectos de la sequía no sólo por la disminución de la altura y de los días a espigamiento y madurez sino también por

las hojas acucharadas senescentes y los tallos más delgados por ejemplo de la variedad Seri M82 bajo riego limitado (Figura 37b) comparada con Seri M82 bajo riego normal (Figura 37a).



**Figura 37. Variedad Seri M82 de la segunda fecha de siembra en Montecillo, repetición 1, el día 10 de abril. a) Bajo riego normal y b) limitado.**

## **5.2. Efecto del nivel de riego, fecha de siembra, y localidad sobre las variables de estudio**

### **5.2.1 Rendimiento de grano**

La sequía que se presentó no fue lo suficientemente severa como para que con el modelo 1 se detectaran las diferencias para rendimiento de grano en cada fecha de siembra entre niveles de riego con los pocos grados de libertad del error (Cuadros 10-13).

Del análisis de varianza para fechas de siembra (Cuadro 15) y de la comparación de medias (Cuadros 17 y 18) se desprende que el rendimiento de grano disminuyó significativamente más por el efecto de fecha de siembra que por nivel del riego en el caso de la segunda fecha de siembra en Celaya. Al respecto, Solís *et al.* (2004) al sembrar en tres fechas de siembra (16 noviembre, 15 diciembre, y 15 enero) en El Bajío, encontraron que las plantas correspondientes a la fecha tardía tuvieron el ciclo biológico más corto y el menor rendimiento de grano asociados con una temperatura media diaria y radiación solar más altas que en la segunda y primera fechas de siembra, lo que influyó negativamente sobre el tamaño del grano, el número de espiguillas por espiga, y la cantidad de granos de floretes distales. De esta manera puede explicarse el menor rendimiento bajo riego normal de la segunda fecha de siembra en Celaya (Cuadro 18) y bajo riego limitado el rendimiento aún menor es debido a la interacción FS\*NR (Cuadro 15). Considerando que los efectos de sequía y temperatura son aditivos (Kaur y Behl, 2010) y en ocasiones de interacción positiva (Prasad *et al.*, 2011) se podría decir que la sequía terminal y las temperaturas máximas y mínimas más altas en el periodo de llenado de grano, cuando se limitó el riego (en promedio 3 °C más alto) en esta segunda fecha de Celaya (Cuadro 29), fueron determinantes en el desempeño de los genotipos; no así para Montecillos, donde entre la primera y segunda fecha de siembra prácticamente no hubo cambio en las temperaturas en el mismo periodo de llenado de grano (apenas 0.6 °C para temperaturas máximas y 0.8 °C para temperaturas mínimas en promedio); esta también podría ser la causa de que en Montecillo, fuera más impactante el déficit hídrico (24 % menos RG en promedio) que la fecha de siembra (1.8 % menos RG en promedio) (Cuadro 18). El efecto de limitar el riego en el periodo de llenado de grano en Celaya

Gto., representó una disminución del rendimiento de grano de 12.4 %, mientras que por siembra tardía la disminución fue de 33 %; con estos datos resulta más conveniente para el productor sembrar temprano que limitar un riego.

Entre localidades, el rendimiento de grano fue mayor ( $P=0.05$ ) en Montecillo que en Celaya; las temperaturas más frescas y el más largo ciclo de cultivo ( $P=0.05$ ) (Cuadro 20) explican esta ventaja. Este resultado se confirma con la comparación de medias de las variables entre ambientes (Cuadro 23) en el que las dos fechas de siembra en Montecillo presentan un rendimiento similar entre ellas pero diferente respecto a las fechas de siembra en Celaya. No obstante dicha ventaja, en Valles Altos de México no se cultiva el trigo en invierno-primavera, porque en siembras tempranas está presente el peligro de heladas tardías en floración y en siembras tardías el inicio de las lluvias en cosecha es un inconveniente.

### **5.2.2 Altura de planta**

El nivel de riego produjo un cambio significativo ( $P=0.05$ ) en la altura de las plantas solamente en la segunda fecha de siembra de Montecillo (Cuadro 14) donde el contenido de humedad estuvo debajo de PMP desde los 45 dds, en cambio Amiri *et al.* (2013) observaron que tan sólo la sequía terminal redujo la altura de 80 genotipos de trigo harinero en promedio 1.23 %. Por su parte, Okuyama *et al.* (2005) encontraron diferencias en altura debido a la falta de agua desde grano lechoso hasta madurez pero únicamente en una de las dos primeras fechas de siembra de dos años y la sequía aplicada desde el inicio del estado de bota hasta madurez afectó significativamente la altura sólo en una de las segundas fechas de siembra de esos dos años. Los

investigadores mencionaron que posiblemente no hubo grandes diferencias debido a que la intensidad y duración de la sequía no fueron suficientes.

Considerando las dos fechas de siembra de cada localidad en el análisis, bajo riego limitado la altura de las plantas sembradas tanto en Celaya como en Montecillo fue menor que en riego normal (Cuadro 21) y esta diferencia es más pronunciada en Montecillo por la duración del déficit hídrico del suelo. Así también Gupta *et al.* (2001) encontraron que el déficit hídrico en el estado de bota disminuyó más la altura de planta que cuando se impuso el estrés en antesis. La altura de planta tiene una correlación significativa con el rendimiento de grano cuando se pretende disminuir la altura y aumentar la longitud de espiga (Khiabani *et al.*, 2015), en el caso de la presente investigación, la altura de planta no está correlacionada con el rendimiento de grano (Figura 12) y la regresión paso a paso no incluye esta variable para explicar el rendimiento (Cuadros 27 y 28), aunque en las primeras décadas de mejoramiento (Figura 13) la acción de los genes del enanismo en la transferencia de asimilados a la espiga redundó sobre el rendimiento aumentando el número de floretes fértiles y por tanto el número de granos por espiga (Siddique *et al.*, 1989a; Miralles *et al.*, 1998). Es deseable que las plantas sigan siendo semienanas para evitar el acame si suceden fuertes vientos y chubascos.

### **5.2.3 Contenido de clorofila**

El contenido de clorofila solamente varió significativamente ( $P=0.05$ ) al pasar de riego normal a riego limitado en la primera fecha de siembra en Montecillo (Cuadro 12) a pesar de la suspensión del riego antes del registro de esta variable para todas las

fechas de siembra. En la primera fecha de siembra de Celaya la lluvia después de la suspensión del riego menguó el efecto del riego limitado. Jiang y Huang (2001) observaron en el caso de pastos que la proporción en que disminuye la clorofila depende de la duración y el tipo de estrés, ya sea por sequía, calor o una combinación de ambos. Dichos investigadores reportaron que todavía el contenido de clorofila era mayor en las festucas estresadas por sequía que en las plantas control después de 12 días de aplicado el tratamiento de sequía. Otro aspecto que pudo haber influido para que el contenido de clorofila no se afectara significativamente fue la nutrición con nitrógeno en Celaya. El contenido de nitrógeno en el suelo era medio en Celaya. Adicionalmente en las dos fechas de siembra de Celaya fue aplicada una segunda fertilización con nitrógeno. Al respecto, Yang *et al.* (2001) encontraron que el contenido de nitrógeno y clorofila en las hojas de plantas que tuvieron alta disponibilidad de urea fue más alto que en hojas con una cantidad normal de fertilizante bajo los mismos niveles de déficit hídrico (moderado y severo).

Como promedio de las dos fechas de siembra en Montecillo el contenido de clorofila registrado en el periodo de llenado fue 5.8 % mayor significativamente en riego normal que en riego limitado (Cuadro 21). La reducción del contenido de clorofila medido mediante la extracción de los pigmentos fotosintéticos que Lonbani y Arzani (2011) estimaron en trigos y triticales bajo estrés por sequía desde el estado de bota fue 11.25 %. El contenido de clorofila en trigos harineros puede disminuir hasta 25 % bajo los déficits de humedad más severos y esta disminución es atribuida a la disminución en el contenido relativo de agua de la hoja bandera (Paknejad *et al.*, 2007). Zarei *et al.* (2013) encontraron a través de un análisis de correlación que a mayor susceptibilidad al estrés

por sequía o por calor de trigos duros y harineros menor era el contenido de clorofila. En trigos harineros de primavera con problemas de humedad edáfica desde antes, el proceso de senescencia comenzó antes que en las plantas con riego suficiente debido a una acelerada pérdida de nitrógeno (Yang *et al.*, 2001) y clorofila (Saeedipour, 2012). Posiblemente en parte por esta razón en el presente trabajo, aunque la sequía no fue lo suficientemente severa, se adelantó la madurez de las plantas bajo riego limitado.

El contenido de clorofila resultó correlacionado con el rendimiento de grano más que EPMC con RG (Figura 12) y, según las regresiones paso a paso para localidades y para niveles de riego el contenido de clorofila registrado en el periodo de llenado de grano ayuda a explicar el rendimiento (Cuadros 27 y 28). Cuando en el periodo de llenado de grano las cuatro fechas de siembra presentaban la humedad edáfica debajo de PMP, el contenido de clorofila fue medido (CL2) y a través de las eras tiende a ir en aumento bajo riego limitado, siendo su relación con las eras positiva y lineal como la de RG con las eras. Bajo riego normal CL2 también ha ido incrementándose aunque en la era 7 hubo un descenso (Figura 15). Algunos programas de mejoramiento genético en otros lugares han puesto énfasis en el contenido de clorofila como un criterio asociado al rendimiento. Pleijel *et al.* (2006) reportaron que una variedad sueca de trigo harinero de primavera de hace más de 100 años tuvo una concentración de clorofila significativamente menor que una variedad moderna. Por su parte, Nakforoosh *et al.* (2015) encontraron que trigos subutilizados comparados con trigos modernos tuvieron menor concentración de clorofila y conductancia estomática lo que les confiere superioridad tanto en condiciones de suficiente y limitada humedad edáfica. En el caso del programa de mejoramiento de trigo del INIFAP el contenido de clorofila no ha sido un criterio de selección (Comunicación

personal Dr. Villaseñor, Septiembre 2015) pero ha tenido un avance como resultado colateral de las estrategias de mejoramiento.

#### **5.2.4 Temperatura del dosel**

Ya sea que la humedad del suelo haya sido alta al momento de la lectura o no, las diferencias de la temperatura del dosel entre riego normal y riego limitado no fueron significativas. Según Blum *et al.* (1982), sólo cuando el estrés hídrico es bastante severo las diferencias de temperatura del dosel son significativas.

En suma de las dos fechas de siembra de Celaya, la temperatura del dosel fue más alta bajo riego limitado (Cuadro 21); esta desigualdad indica que las plantas bajo riego limitado estuvieron experimentando estrés (Blum *et al.*, 1989). El análisis de varianza para ambientes (Cuadro 22) muestra que la temperatura del dosel no fue afectada por los tratamientos, además no tuvo correlación con RG (Figura 12) ni contribuyó a explicarlo (Cuadros 27 y 28).

#### **5.2.5 Días a espigamiento y días a madurez**

De acuerdo con el modelo 1 que es más estricto, aun cuando hubo diferencias en los días a madurez entre riego normal y limitado en todas las fechas de siembra, tales diferencias fueron significativas sólo para la primera fecha de siembra en Montecillo y la primera de Celaya.

Los análisis de los datos con los modelos 2-5 indican que hubo diferencias significativas de los días a espigamiento y los días a madurez entre riego normal y limitado (Cuadros 15, 19, y 22). May y Milthorpe (1962) afirmaron que la habilidad de

madurar antes del establecimiento de una sequía alargada era posiblemente el factor más importante de la resistencia a sequía de los cultivos propios de zonas áridas como el trigo en el sur de Australia. Recientemente, Bazzaz *et al.* (2014) reportaron también la reducción de los días a madurez de 11 variedades de trigo bajo estrés hídrico y lo correlacionaron positivamente con la duración del llenado de grano. Según el Cuadro 21 por limitar el riego, el tiempo a madurez disminuyó 4 días en Celaya y en Montecillo 9 días, esta diferencia entre localidades es debida a que en Celaya el estrés por sequía sucedió a partir del periodo de llenado de grano y en Montecillo sucedió desde la etapa vegetativa. Al respecto, Sikuku *et al.* (2010) encontraron que los días a cosecha de variedades de arroz se reducían cada vez más conforme pasaba más tiempo sin regar. El frijol Pinto Villa redujo sus días a madurez en una condición con riego de 93 a 80 en sequía terminal (a partir de floración), y a 77 en sequía intermitente (riego suspendido una vez en etapa vegetativa y otra vez en etapa reproductiva) (Rosales-Serna *et al.*, 2004). En concordancia, el grupo de trigos “Subcontinente”, adaptado al mega-ambiente 4 y con déficit de humedad más prolongado, tuvo el espigamiento y maduración más tempranas pero con el periodo de llenado de grano más largo comparado con los grupos de germoplasma adaptados a una sequía tardía y otros con riego permanente (van Ginkel *et al.*, 1988). Por la misma razón, el espigamiento se adelantó significativamente 3 días en los experimentos de Montecillo bajo riego limitado pero sólo 0.54 días entre los dos niveles de riego en los experimentos de Celaya (Cuadro 21).

En forma global, bajo riego normal las plantas espigaron un día después en promedio y maduraron casi 7 días después que las plantas bajo riego limitado (Cuadro 24). Kilic y Yagbasanlar (2010) también reportaron que la sequía provocó en trigos duros

la reducción de los días a espigamiento, además esta variable estuvo correlacionada negativa y significativamente con rendimiento de grano, contenido de clorofila, y periodo de llenado de grano. De acuerdo con la Figura 12, los resultados del presente trabajo son que los días a madurez estuvieron más relacionados con el rendimiento de grano que los días a espigamiento y los días a madurez se correlacionaron más con BIO y GPMC que con PMG y NEE los cuales estuvieron cercanos a TLLG.

Dado que los genotipos presentan gran variación en los días a espigamiento y a madurez no pudo establecerse una relación entre estas variables y las eras a las que corresponden los genotipos, lo cual sugiere que los días a espigamiento y a madurez no fueron contemplados siempre como criterios de selección en el mejoramiento genético en México. Por ejemplo 'Baviacora M92', aunque fue formada para condiciones de riego y a pesar de que fue la variedad que más tiempo tardó en madurar, disminuyó menos su rendimiento que otras variedades para temporal y/o que tardaron menos en madurar (Figuras 25 y 26).

### **5.2.6 Longitud de espiga**

La longitud de espiga no fue diferente bajo riego normal que bajo riego limitado en el análisis por cada fecha de siembra. Con relación a esta variable, Liu *et al.* (2015) reportaron que en líneas de trigo harinero con cromosomas adicionales aportados por parientes silvestres el carácter menos afectado por la sequía fue la longitud de espiga,

aun así el análisis de varianza indicó que si hubo diferencias entre las plantas bien regadas y las plantas estresadas por sequía.

Sólo al considerar las dos fechas de siembra de Montecillo se observó que las espigas eran un poco más largas bajo riego normal. En el experimento de Taheri *et al.* (2011) el nivel de estrés produjo un efecto significativo en la longitud de espiga cuando probaron 17 líneas de trigo harinero bajo tres regímenes de humedad: uno con riego suficiente, otro suspendiendo el riego después de antesis, y otro sin riego después de la germinación. Los investigadores afirmaron que hubo correlación positiva y significativa entre rendimiento de grano y longitud de espiga. En el estudio de El-Rawy y Hassan (2014) dado que este carácter tuvo una heredabilidad de moderada a baja (0.38) y aunque su correlación con el rendimiento de grano fue positiva y significativa pero no fuerte con el ambiente más estresante de humedad, no fue elegido como un índice para identificar trigos harineros tolerantes a sequía. En la presente investigación la casi nula afectación en la longitud de espiga pudo deberse a que la sequía no fue severa. Esta variable puede explicar significativamente junto con CL2 y DM el rendimiento de grano en cada localidad y en cada nivel de riego (Cuadros 27 y 28) pero en forma global no estuvo correlacionada con RG (Figura 12). Por su parte, Mohammadi *et al.* (2012) encontraron que la longitud de espiga estuvo correlacionada con el rendimiento en condiciones de estrés hídrico pero no en condiciones óptimas de humedad edáfica.

Según la Figura 16 las espigas tienden a aumentar de longitud a través de las eras tanto en riego normal como en riego limitado pero en la última década parece que ya no es un criterio para aumentar el rendimiento, en cambio pueden observarse espiguillas y granos cada vez más grandes.

### 5.2.7 Número de espiguillas por espiga

El número de espiguillas por espiga queda determinado en la etapa 5.0 de Feekes (GS30 Zadoks) cuando la planta se vuelve erecta y ya terminó el desarrollo de macollos (Miller, 1992). Al iniciar esta etapa se suspendió el riego en las dos fechas de siembra en Montecillo bajo riego limitado. Sin embargo, no hubo afectación sobre el número de espiguillas según el análisis de varianza (Cuadros 12 y 13). Como en Celaya la sequía fue terminal este carácter no fue alterado.

El análisis de los datos de los ambientes y el combinado no indican cambios en el número de espiguillas al pasar de una condición a otra (Cuadros 24 y 25a), de acuerdo con lo visto en campo bajo riego limitado hubo espiguillas formadas en la base de la espiga pero tenían sólo un grano o sus granos eran muy pequeños. También Dencic *et al.* (2000) en su estudio encontraron que el número de espiguillas por espiga fue junto con altura de planta los caracteres menos sensibles a la sequía posiblemente porque al inicio de la diferenciación de las espiguillas todavía contaban las plantas con una adecuada humedad en el suelo. Esto concuerda con los resultados de Majid *et al.* (2007) pues en dos años de evaluación el estrés por sequía en pre y post anthesis no cambió significativamente el número de espiguillas por espigas, además este carácter estuvo correlacionado negativamente pero no significativamente con el rendimiento de grano bajo condiciones limitantes de humedad edáfica. En la presente investigación hasta la década de los noventa el NEE tendía a aumentar y después ha ido disminuyendo (Figura 17). Con relación a lo anterior, Álvaro *et al.* (2008) reportaron que el NEE aumentó 7.5 % como resultado del mejoramiento realizado durante el siglo XX en variedades italianas pero no en variedades españolas, aún más el aumento del número de granos por

espiguilla no se debió al aumento del NEE sino al mayor número de floretes fértiles y cuajado del grano.

### **5.2.8 Peso de mil granos**

El peso de mil granos (PMG) fue diferente entre el riego normal y el riego limitado solamente para la segunda fecha de siembra en Celaya (Cuadro 14) posiblemente debido a que las temperaturas máximas que fueron más altas en este experimento causaron una mayor evaporación y evapotranspiración, lo cual a su vez intensificó de alguna manera el efecto de la restricción del riego como sucedió en el experimento de Shah y Paulsen (2003) quienes combinaron el estrés por sequía y el estrés por calor y encontraron que la sequía hizo disminuir el peso de grano a 15/10, 25/20, y 35/30 °C (día/noche) además, las altas temperaturas en interacción con el estrés por sequía acentuó el daño a la fotosíntesis, área foliar, y rendimiento de grano. Así mismo, los investigadores reportaron que la duración del llenado de grano fue cada vez menor conforme aumentaba la temperatura sin estrés por sequía y era todavía mucho menor conforme aumentaba la temperatura combinada con sequía.

Al analizar los datos de las dos fechas de siembra de cada localidad (modelo 2) el nivel de riego ocasionó diferencias significativas (Cuadros 15 y 16) siendo el PMG menor bajo riego limitado en ambas localidades. Con el modelo 3 (Cuadro 21) la diferencia entre niveles de riego en Celaya fue de 8 % y en Montecillo de 5 % menor bajo riego limitado. Con el modelo 4 (Cuadro 24), en el que se consideran los cuatro ambientes, la comparación de medias indica que al pasar de una condición a otra el PMG se redujo en 6.5 %. El crecimiento del grano es afectado probablemente por una reducción de la tasa

de asimilación neta y de la acumulación de azúcares en el tallo resultado de la disminución de la conductancia estomática y la fotosíntesis neta debido a la sequía (Kobata *et al.*, 1992). El PMG tanto en riego normal como en riego limitado se relaciona linealmente y positivamente con la era de liberación sugiriendo que este carácter ha contribuido significativamente al aumento del rendimiento en los últimos 67 años (Figura 18).

### **5.2.9 Índice de cosecha**

El efecto del nivel de riego sobre el índice de cosecha no fue significativo cuando se consideraron en el análisis cada fecha de siembra por separado, las dos fechas de siembra de Montecillo, y los cuatro ambientes a la vez (Cuadros 10-13, 16 y 22) posiblemente porque la re-movilización de las reservas del tallo es más eficiente bajo estrés severo que bajo estrés moderado (Koocheki *et al.*, 2014). Si los azúcares en el tallo disminuyen y la re-movilización aumenta bajo estrés por sequía, se esperaría en esta condición un mayor índice de cosecha pero en la presente investigación la madurez se adelantó y se redujo el periodo de llenado de grano de modo que el peso del grano también disminuyó. Por otra parte, los genotipos que tardaron en madurar como 'Baviacora M92', 'Borlaug 100 F2014' (bajo riego limitado y riego normal), 'Nana F2007', 'Pavón F76' y 'Temporalera M87' (bajo riego normal) tuvieron un periodo de llenado de grano y TLLG diferente.

Las plantas con riego normal presentaron significativamente un mayor índice de cosecha que las plantas con riego limitado sólo en el análisis al tomar en cuenta las dos fechas de siembra en Celaya (Cuadro 15). El IC ha sido mayor bajo riego normal que

bajo riego limitado a través de las eras excepto en la última década en la que IC bajo riego limitado supera al IC bajo riego normal (Figura 23). De manera similar Guarda *et al.* (2004) y los de Álvaro *et al.* (2008) reportaron que la eficiencia de la translocación de los asimilados a los granos aumentó significativamente con el paso de los años. Por otra parte se ha encontrado una relación positiva y significativa entre rendimiento de grano e índice de cosecha (Taheri *et al.*, 2011) lo que en la presenta investigación no sucedió (Figura 12).

#### **5.2.10 Biomasa aérea**

Con el modelo 1 no se obtuvieron diferencias significativas en este carácter por el efecto del nivel de riego, en cambio con los datos de las dos fechas de siembra por cada localidad (modelo 2) y para localidad (modelo 3) si hubo diferencias significativas entre la biomasa acumulada bajo riego normal y la acumulada bajo riego limitado (Cuadros 15, 16, y 21). En el estudio realizado por Villegas *et al.* (2001) en trigo duro la reducción de la acumulación de biomasa aérea causada por la sequía se debió a la disminución de la tasa media de crecimiento.

La diferencia en la disminución de la biomasa entre riego normal y limitado fue menor en Celaya (7.6 %) que en Montecillo (23.4 %) debido a que en Celaya el ciclo de cultivo se acortó menos que en Montecillo (Cuadro 21) y en general (tomando a la vez los cuatro ambientes) la disminución fue de 16.8 % (Cuadro 24). El ambiente 3 (segunda fecha de siembra en Celaya) fue el que presentó la menor acumulación de biomasa aérea porque según Asseng *et al.* (2004) la menor biomasa puede esperarse de los ciclos más cortos de crecimiento. El ciclo del ambiente 3 fue el más corto, con un promedio de días

a madurez de 109 comparado con 140 días a madurez del ambiente 2 (primera fecha de siembra en Montecillo) donde se obtuvo la mayor biomasa. El efecto de las temperaturas más altas en la segunda fecha de siembra de Celaya también influyó en la reducción de los días a madurez y en la acumulación de biomasa (Cuadro 17).

La magnitud de la disminución de la biomasa no correspondió con la disminución del índice de cosecha pues probablemente hubo menos fotoasimilados para todos los órganos y aun cuando aquéllos se hubiesen re-movilizado hacia el grano, el periodo de llenado de grano acortado no permitió amortiguar la caída del rendimiento.

La biomasa y el año de liberación tienen una relación positiva y muy significativa (Figura 21) tanto en riego normal y en riego limitado pero en ésta condición el desempeño de los genotipos es pobre comparado con los genotipos bajo riego normal. En contraste, de 1908 a 1978, la producción de materia seca total fue similar y la ganancia genética en el rendimiento se asoció más bien a un mayor índice de cosecha con la selección de genotipos de corta altura, esto de acuerdo a los resultados de Austin *et al.* (1980). Al extender su evaluación hacia el año 1986, los investigadores encontraron que las variedades modernas produjeron una biomasa ligeramente mayor que las antiguas (Austin *et al.*, 1989).

#### **5.2.11 Número de espigas por metro cuadrado**

El análisis aunando fechas de siembra por cada localidad detectó un cambio significativo en el número de espigas por metro cuadrado (EPMC) de los genotipos al pasar de riego normal a riego limitado. En el caso de García del Moral *et al.* (2003) los regímenes de humedad también afectaron el EPMC, además el carácter estuvo

relacionado positivamente con el rendimiento de grano sólo en condiciones de temporal, y estuvo relacionado recíprocamente con la duración del periodo vegetativo; tal vez por ello la diferencia entre niveles de riego para EPMC es mayor en Montecillo que en Celaya. El análisis para ambientes (Cuadro 22) y la comparación de medias (Cuadro 24) indican que la limitación del riego hizo disminuir el EPMC en 11.5 % comparado con el riego normal, mientras que la reducción al pasar de una fecha de siembra a otra fue 9 y 10 % para Celaya y Montecillo respectivamente (Cuadro 17).

Según las Figuras 12 y 19 no parece haber una relación entre EPMC y RG. El EPMC bajo riego normal tiende a decrecer a través de las décadas al contrario de lo que sucede con RG. Lo anterior no concuerda con los resultados de Austin *et al.* (1989) quienes reportaron un incremento de 14 % en EPMC, ni con el aumento de 124 granos más por unidad de área reportado por Guarda *et al.* (2004) de las variedades modernas respecto de las antiguas.

### **5.2.12 Número de granos por metro cuadrado**

Con base al modelo 1, el número de granos por metro cuadrado (GPMC) varió en condición de déficit hídrico respecto a riego normal en la primera fecha de siembra en Celaya y en la segunda fecha de siembra en Montecillo (Cuadro 14). Como el carácter está asociado con la variación ambiental pre-antesis (Fischer, 1985) y como durante cinco días aproximadamente al inicio del periodo de espigamiento la humedad edáfica estuvo cercana a 25 % bajo riego limitado (Figura 3) en la primera fecha de siembra en Celaya, esto pudo causar una disminución del número de granos por espiga y el por

ciento de granos cuajados debido a la infertilidad de los floretes primario y secundario dentro de cada espiguilla (Saini y Aspinall, 1981). La fase temprana de división celular es vulnerable incluso a una sequía moderada provocando la infertilidad de las espiguillas de la punta de la espiga (Nicolas *et al.*, 1985). También se encontraron diferencias del GPMC debido al nivel de riego considerando las dos fechas de siembra de cada localidad: en Celaya la reducción fue del 8 % y en Montecillo del 19 % (Cuadro 21), al respecto de dicha diferencia, Shamsi y Kobraee (2011) señalaron que cuando el estrés hídrico fue impuesto desde la elongación del tallo hasta que la madurez se completó, la magnitud de la reducción de los granos por espiga fue mayor significativamente que cuando se aplicó la sequía a partir de la etapa de bota y a partir del llenado de grano. En general (modelo 4) bajo riego limitado las variedades produjeron 2333 granos menos (14.5 %) que bajo riego normal (Cuadro 24). EL GPMC resultó ser la variable de mayor importancia del componente principal 1 (Cuadro 26) y muy cercano a RG (Figura 12) lo que coincide con el experimento de Guendouz *et al.* (2014) quienes correlacionaron positivamente el GPMC con el rendimiento de grano bajo riego y temporal. La relación entre GPMC y la era de liberación fue positiva y lineal como la de RG aunque no tan fuerte, y con una intercepción menor en riego limitado (Figura 22). Otros investigadores también observaron un mayor GPMC con el paso de los años (Austin *et al.*, 1989) y lo relacionaron con una mejor partición de asimilados y una mayor duración del periodo en que las espiguillas obtuvieron carbohidratos (Isidro *et al.*, 2011).

Para la segunda fecha de siembra en Celaya el GPMC se redujo en 20 % comparado con la primera fecha, en tanto que no hubo diferencias en Montecillo por las

temperaturas máximas y mínimas más similares entre fechas de siembra durante el llenado de grano (Cuadros 17 y 35).

### **5.2.13 Tasa de llenado de grano**

El factor nivel de riego produjo un cambio significativo en la tasa de llenado de grano (TLLG) de la primera fecha de siembra en Celaya de acuerdo al análisis de varianza de cada fecha de siembra (Cuadro 14) y “sumando” las fechas de siembra (modelo 2) se detectó que la TLLG fue superior bajo riego normal que bajo riego limitado en ambas localidades (Cuadros 15, 16, y 17), siendo la diferencia más acentuada en Montecillo (donde la sequía también ocurrió en el llenado de grano) por el alargamiento del ciclo y periodo de llenado de grano de las plantas bajo riego normal y el acortamiento del ciclo bajo riego limitado y duración de la sequía. Madani *et al.* (2010) explicaron que el efecto de la sequía se manifiesta a través de una menor tasa de llenado de grano y reparto de materia seca porque se restringe la demanda de fotoasimilados. Tal restricción de la demanda es atribuible a un menor número de células del endospermo y gránulos de almidón por célula cuando las plantas sufren de estrés hídrico inmediatamente después de antesis (Nicolas *et al.*; 1985a). La división celular en el endospermo está regulada por una relación C:N constante debida a una menor translocación de nitrógeno a través del tallo inducida por la sequía (Nicolas *et al.*; 1985b). El análisis de varianza para ambientes y la comparación de medias (Cuadros 22 y 24) indican que la TLLG fue 9 % mayor significativamente bajo riego normal que bajo riego limitado lo que influyó probablemente en el mayor peso de los granos. Según Jockovic *et al.* (2014) en su estudio el peso de grano por espiga estuvo correlacionado positiva y significativamente

con la TLLG; en la presente investigación la TLLG se correlacionó con PMG y RG (Figura 12).

La TLLG se relacionó significativamente con la era de liberación (Figura 20) y dicha relación es muy similar a la de RG: lineal, positiva, y fuerte, por lo tanto puede decirse que ha contribuido al progreso de RG. En cambio, para trigos duros liberados en un lapso de 100 años, la TLLG estuvo correlacionada negativamente con el año de liberación de las variedades lo que no se traduce necesariamente en un menor peso de grano pues intervino también la duración del periodo de llenado de grano (Motzo *et al.*, 2010).

En la segunda fecha de siembra en Celaya, la TLLG disminuyó 14 % respecto a la primera por la reducción tanto del número de días a madurez como del rendimiento. Lo contrario sucedió en Montecillo donde la TLLG fue 10 % menor en la primera fecha de siembra en virtud de que el rendimiento no sufrió cambios pero si se redujeron los días a madurez.

#### **5.2.14 Peso hectolítrico**

La limitación del riego hizo disminuir el peso hectolítrico (PHL) significativamente en la segunda fecha de siembra de Celaya en 4.2 %. Un déficit severo de humedad y no uno moderado (Guttieri *et al.*, 2001) podría tener en el peso hectolítrico un efecto similar al de una sequía moderada potenciada por temperaturas más altas. Kaur y Behl (2010) explicaron que cuando se retrasa la fecha de siembra el peso hectolítrico disminuye debido a que la etapa reproductiva coincide con temperaturas más altas. Un estudio realizado durante 50 años en Canadá revela que las temperaturas máximas diarias han

aumentado desde inicios de julio mientras que la precipitación diaria ha disminuido en julio y al final del mes durante el llenado de grano. Las temperaturas de agosto hacen que se reduzca el peso hectolítrico y la precipitación disminuida de julio está correlacionada con el carácter (McCaig, 1996). Tomando en cuenta los datos de las dos fechas de siembra en Celaya, el peso hectolítrico disminuyó 2.5 % al pasar de riego normal a riego limitado (Cuadro 21) mientras que en Montecillo la diferencia entre los niveles de riego no fue significativa. El análisis de los 4 ambientes y la comparación de medias (Cuadros 22 y 24) indican que el riego limitado produjo un pequeño cambio pero significativo y negativo de 1.3 % en el peso hectolítrico.

Esta variable estuvo asociada con RG (Figura 12) pero no pudo relacionarse con la era de liberación de las variedades porque en promedio los genotipos de la década de los años 40 presentaron un PHL similar al de 'Salamanca S75' y al de 'Seri M82'; además, 'Lerma Rojo' tuvo un PHL superior a 'Temporalera M87' y análogo a 'Nana F2007', siendo la primera variedad de los años 50 (Cuadro 2A). Cortázar S94 presentó el PHL más bajo de todas las variedades, no aceptable para la industria. En la última década es notorio el esfuerzo por mejorar este carácter. En los resultados de Guarda *et al.* (2004) tampoco se observa una relación entre el PHL y el año de liberación más bien la variación entre variedades para este carácter está ligada a los genotipos individuales.

Por sembrar tardíamente en Celaya, el PHL pasó de 76 a 72 kg hL<sup>-1</sup>, es decir, el producto pasó de ser aceptado a ser rechazado según los criterios de la industria molinera.

### 5.3 Interacción era - genotipo por niveles de riego.

Todas las eras disminuyeron su rendimiento al pasar de riego normal a riego limitado (Figura 24). Los dos genotipos dentro de cada era difieren en su respuesta a la sequía (Figura 25), es decir, no hay una tendencia o patrón respecto a la interacción de los genotipos con el nivel de humedad edáfica a través de los años. Las dos variedades dentro de la era 3 fueron las que se parecieron más y las variedades dentro de las eras 6 y 7 difirieron mucho. Esta apreciación cualitativa no corresponde con la evaluación de Calderini y Slafer (1999) quienes reportaron una disminución en la estabilidad del rendimiento debido al mejoramiento genético durante 1962-1988 en México; según su estudio las variedades modernas fueron más sensibles a los cambios en la disponibilidad de recursos, y a pesar de esto su rendimiento siguió siendo más alto que las variedades más antiguas en los ambientes de menor rendimiento. Esto no sucedió en el caso de 'Bacorehuis F2015', 'Nana F2007', 'Roelfs F2007', y 'Cortázar S94' que siendo variedades más recientes que 'Baviacora M92' su rendimiento no fue más alto que el de la última bajo riego limitado. Lo mismo se observa de 'Temporalera M87', 'Seri M82', y 'Pavón F76' respecto a 'Salamanca S75' (Figura 25).

'Borlaug 100 F2014', 'Bacorehuis F2015' y 'Baviacora M92', desarrolladas para condiciones de riego, mostraron comportarse bien bajo sequía. Estas mismas variedades son las que este estudio detectó como las más rendidoras actualmente bajo riego normal junto con 'Nana F2007', que ha destacado en ambientes de sequía, pero esta vez no tuvo buen desempeño bajo riego limitado (Figura 26) posiblemente porque está recomendada para siembras en verano (Villaseñor *et al.*, 2008) y no para siembras de

invierno. En conexión con lo primero, Lopes *et al.* (2012a) descubrieron en su investigación que salvo ciertas excepciones, las variedades y líneas más rendidoras (por fecha de liberación) no fueron las mismas en ambientes de pequeño, medio, y alto rendimiento.

#### **5.4 Interacción era - genotipo por fechas de siembra**

La relación entre la era de liberación y el rendimiento obtenido en las dos fechas de siembra de Celaya indica que aunque el rendimiento ha sido mayor a través de las eras para la primera fecha de siembra, el fitomejoramiento está siendo efectivo dadas la tasa de progreso mayor para este tipo de ambientes estresantes por calor (Figura 11). Además, en el futuro podría acortarse la brecha de rendimiento entre fechas de siembra temprana y tardía.

Se puede decir que la era 8 y luego la 6 en Celaya son las que más interactuaron con el calor por el cambio abrupto observado (Figura 27) al pasar de una fecha de siembra a otra, y sugiriendo que aunque 'Borlaug 100 F2014' sea resistente a la sequía es sensible al calor (Figura 28). En contraste, 'Nana F2007' y 'Yaktana 54C' fueron las variedades que bajaron menos su rendimiento. Sin embargo, los granos de 'Nana F2007' de la fecha de siembra tardía bajo riego limitado quedaron chupados y de color oscuro. Si llegaran a aumentar las temperaturas como se tiene pronosticado, el rendimiento caería como en este caso en que temperaturas mayores en la segunda fecha de siembra hicieron disminuir el valor de todos los componentes del rendimiento y el rendimiento mismo. Rajaram *et al.* en 1988, cuando apenas se había formado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, recomendaron que las

variedades nuevas deben ser resistentes a sequía y a calor en las regiones de riego en vista de la reducción del riego y el retraso de la siembra; ahora en vista de un cambio probable en algunos sitios y en otros ya realizado en la distribución y cantidad de la lluvia y el alza de las temperaturas, tales características son imprescindibles en los trigos para todos los ambientes donde se siembra en la actualidad.

En Montecillo las eras 2 y 3, y las eras 6 y 7 mostraron la misma diferencia fenotípica bajo la primera y segunda fecha de siembra (Figura 32) indicando que no interaccionan con el ambiente (Molina, 1992). Las otras eras disminuyeron o aumentaron su rendimiento, específicamente el rendimiento de 'Pavón F76', 'Baviacora M92', y 'Roelfs 2007' fue algo mejor en la segunda fecha (Figura 33).

Las unidades calor acumuladas en la segunda fecha de siembra en ambas localidades fueron menos que las acumuladas en la primera lo que demuestra que el requerimiento de unidades calor para completar el ciclo de crecimiento disminuyó con el retraso de la siembra (Rajput *et al.*, 1987).

La diferencia entre la interacción de los genotipos en Celaya y de éstos en Montecillo se debe a que aunque la diferencia en unidades calor acumuladas entre la primera y segunda fecha de siembra en las dos localidades fue significativa (Figuras 30 y 35), las temperaturas en Montecillo fueron más bajas que en Celaya y la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de la primera y segunda fecha de siembra en Celaya fueron más altas (3 °C) que las temperaturas máximas (0.6 °) y mínimas (0.8 °C) en Montecillo. Al respecto, basta el aumento 1 °C de la temperatura durante la estación

de crecimiento del trigo para que el rendimiento disminuya del 3 al 10 % (You *et al.*, 2009).

Cuando se evalúan genotipos en diversos ambientes de prueba lo común es que se comporten de manera inestable (Molina, 1992) por lo que los mejoradores de trigo han estado conformando genotipos que al menos rindan regular en ambientes estresantes y al máximo en ambientes óptimos (Rajaram, 1989; Comunicación Dr. Villaseñor, Enero 2015). La interacción de los genotipos con el nivel de riego fue “menor” que la interacción con fechas de siembra sugiriendo que es necesario realizar el mejoramiento en diferentes ambientes todavía más estresantes por calor para controlar más el efecto de la interacción genotipo-ambiente (Molina, 1992).

## **5.5 Regresión paso a paso**

Sin considerar los componentes directos del rendimiento (peso y número de granos), las variables que contribuyen positivamente a RG fueron CL2, DM, y LE tanto en Celaya como en Montecillo explicando el 64 y 62 % respectivamente de la variación, y tanto en riego normal como en riego limitado justificando un 74 y 64 % respectivamente de la variación en RG (Cuadros 27 y 28). Moetamadi *et al.* (2015) si incluyeron los componentes del rendimiento en su análisis de regresión múltiple, encontrando, bajo estrés por sequía, que la variación del rendimiento más bien se atribuyó al contenido de clorofila y a los componentes del rendimiento.

## 5.6 Ganancia genética del rendimiento de grano y sus componentes en general y bajo riego normal y limitado

El coeficiente de regresión reveló que la era de liberación de las variedades contribuyó significativamente a explicar el rendimiento de grano (Figura 8); es decir, los mejoradores han hecho un aporte trascendental a México que representa  $2.8 \text{ t ha}^{-1}$  de ganancia en 67 años (1.21 % anual o  $41.77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Este resultado es semejante al progreso estimado por Nalley *et al.*, (2010) de 1.53 toneladas en 40 años ( $38.25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) con base en los datos del programa de mejoramiento del CIMMYT instalado en el Valle del Yaqui. La estimación del progreso que realizaron Lopes *et al.* (2012a) y Sayre *et al.* (1997) fue 0.7 y 0.8 % respectivamente, y el periodo que evaluaron está incluido en esta investigación

Es conveniente señalar que hubo coincidencia en estos estudios con el presente sobre la tendencia lineal y positiva del comportamiento del progreso de la ganancia del rendimiento de grano; tal tendencia tuvo un ajuste con el modelo lineal de  $R^2=0.954$ . Además es importante resaltar que en las cuatro fechas de siembra manejadas en la presente investigación se mantuvo un control total de las royas, situación que de no mantenerse seguramente los avances genéticos serían mayores, ya que de acuerdo con Singh *et al.* (2005), una de las aportaciones del mejoramiento genético de trigo en México ha sido hacia la resistencia genética a estos patógenos.

El progreso de RG aquí revelado se relacionó más con un mayor número de granos por metro cuadrado; también contribuyeron un mayor contenido de clorofila, peso de mil granos, tasa de llenado de grano, biomasa acumulada, e índice de cosecha. En cambio

para Lopes *et al.*, (2012a) la ganancia en RG estuvo asociada con mayor peso de mil granos, temperaturas del dosel más bajas en el periodo de llenado de grano, menos días a espigamiento y el aumento de la duración del color verde. Los tres últimos caracteres se ajustaron a una función lineal mientras que el peso de mil granos se ajustó a una función cuadrática y cúbica. En esta investigación el PMG se ajustó a una función cuadrática y cóncava (término cuadrático positivo) al igual que la biomasa aérea, esto significa que su tendencia en las últimas décadas es aumentar en mayor proporción que el RG. Para TLLG y GPMC la regresión fue lineal y positiva lo que indica que han aumentado de la misma manera que RG. Isidro *et al.* (2011) también observaron un mayor GPMC con el paso de los años y lo relacionaron con una mejor partición de asimilados y un más largo periodo de llenado de grano. En este momento todavía hay una brecha de los valores de los componentes del rendimiento entre riego normal y limitado pero de acuerdo a las regresiones de PMG, TLLG, y GPMC la tendencia es que en las próximas décadas sus valores serán semejantes para ambas condiciones. Por su comportamiento a través de las eras podríamos decir que PMG, TLLG, BIO, y GPMC han contribuido al rendimiento. El carácter EPMC tuvo una relación cuadrática negativa con la era de liberación bajo riego normal, lo cual se traduce como una disminución continua con el paso de los años y sugiere que este carácter no ha contribuido al rendimiento de grano. Bajo riego limitado su regresión no pudo ajustarse. En otros países este carácter está siendo seleccionado en programas de mejoramiento, por ejemplo Aharizad *et al.* (2012) estimaron una ganancia de 13 % bajo riego normal y 29 % bajo sequía de líneas endogámicas recombinantes.

La presente investigación pone de manifiesto que el trabajo de mejoramiento en México ha sido eficaz para aumentar continuamente el rendimiento del trigo en condiciones limitantes y óptimas de humedad edáfica por décadas, lo cual recalca Blum (2011) tanto para trigo como para otros cultivos a nivel mundial.

La tasa anual de progreso bajo riego limitado (1.35 %) fue mayor que bajo riego normal (1.10 %), lo cual va acorde con los resultados de Lantican *et al.* (2001) pero es contrario a lo encontrado por Heisey *et al* (2002). Los primeros autores adjudican las mejoras al rendimiento en ambientes estresantes a los esfuerzos realizados en ambientes óptimos al formar genotipos rendidores que luego son usados en cruzas y selección para formar otros apropiados para condiciones limitantes. Además, las ganancias se deben a que los objetivos del mejoramiento han sido los adecuados para ambientes calurosos y secos.

Si el mejoramiento genético de trigo en México continúa al mismo ritmo es posible que el rendimiento de grano llegue a asemejarse para condiciones de riego normal y limitado.

Los mejoradores tienen oportunidad de seguir aumentando el rendimiento disminuyendo la brecha que hay entre riego normal y limitado para biomasa aérea, y aumentando el número de espigas por metro cuadrado en los genotipos sobresalientes. Con el fin de seguir manteniendo el progreso genético del rendimiento de trigo, Fischer y Edmeades (2010) propusieron la mejora en el uso eficiente de la radiación que es una función de la tasa fotosintética y distribución de la luz en el cultivo porque esta es la manera de aumentar la acumulación de biomasa que está ligada al progreso genético

actual. Por otro lado Lopes *et al.* (2012b) sugieren que la tasa de progreso incluso podría incrementarse en ambientes estresantes si los caracteres de adaptación a la sequía y al calor son reunidos en un mismo genotipo.

## 6. CONCLUSIONES

Esta investigación indica que las estrategias, técnicas y métodos de mejoramiento utilizados en México han sido eficaces para aumentar continuamente el rendimiento del trigo en condiciones limitantes y óptimas de humedad edáfica por décadas.

La ganancia genética del rendimiento de grano promedio es de 1.21 % anual que representa un aumento acumulado de 2.8 t ha<sup>-1</sup>. Bajo riego normal, el progreso de 1.10 % es menor que el de riego limitado (1.35 %) y esto sugiere que en el futuro el rendimiento podría ser semejante en ambos niveles de riego o que podría extenderse el área de siembra utilizando la misma cantidad de agua empleada actualmente.

El efecto de limitar el riego en el periodo de llenado de grano en Celaya Gto., representa una disminución del rendimiento de grano de 12.4 %, mientras que por siembra tardía la disminución es mayor 33 % con estos datos resulta más conveniente para el productor sembrar temprano que aplicar un último riego. El efecto perjudicial sobre el rendimiento de grano aumenta cuando la siembra es tardía y con riego limitado debido a las altas temperaturas ocurridas en el periodo de llenado de grano. Esto mismo puede esperarse que suceda si los pronósticos acerca del aumento de la temperatura lleguen a hacerse realidad.

En Celaya la segunda fecha de siembra desarrollada en temperaturas más altas el rendimiento presenta una mayor tasa de ganancia genética respecto de la primera.

Los caracteres del trigo presentan cambios significativos en los genotipos modernos respecto a los antiguos, siendo el contenido de clorofila, peso de mil granos,

tasa de llenado de grano, y número de granos por metro cuadrado los que han contribuido de manera continua al rendimiento de grano.

La interacción genotipo por nivel de riego permite visualizar a 'Borlaug 100 F2014', 'Bacorehuis F2015', y 'Baviacora M92' como genotipos que no disminuyen drásticamente su rendimiento al pasar de riego normal a limitado.

El número de genotipos que interacciona con fechas de siembra es mayor en Celaya que en Montecillo, siendo 'Nana F2007' la que baja menos su rendimiento por pasar de una fecha a otra en Celaya.

## 7. REFERENCIAS

- Acevedo, E., P. Silva, and H. Silva. 2002. Wheat growth and physiology. *In*: B. C. Curtis, S. Rajaram and H. Gómez Macpherson (eds.). Bread wheat improvement and production. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Rome, Italy. FAO Plant Production and Protection Series No.30.
- Aggarwal, P. K., and S. K. Sinha. 1984. Effect of water stress on grain growth and assimilate partitioning in two cultivars of wheat contrasting in their yield stability in a drought-environment. *Annals of Botany* 53: 329-340.
- Aggarwal, P. K., and S. K. Sinha. 1987. Performance of wheat and triticale varieties in a variable soil water environment IV. Yield components and their associations with grain yield. *Field Crops Research* 17: 45-53.
- Ahmad, M., and M. A. Arain. 1999. Effect of drought simulation on grain protein and lysine content of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany* 31(1): 109-114.
- Aharizad, S., A. K. Fard, S. A. Mohammadi, and S. Sedaghat. 2012. Evaluation of bread wheat recombinant inbred lines under drought conditions. *Annals of Biological Research*. 3(12): 5744-5747.
- Álvaro, F., J. Isidro, D. Villegas, L. F. García del Moral, and C. Royo. 2008. Old and modern durum wheat varieties from Italy and Spain differ in main spike components. *Field Crops Research*. 106(1): 86-93.
- Amiri, R., S. Bahraminejad, and S. Jalali-Honarmand. 2013. Effect of terminal drought stress on grain yield and some morphological traits in 80 bread wheat genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 5(10): 1145-1153.

- Asseng, S., P. D. Jamieson, B. Kimball, P. Pinter, K. Sayre, J. W. Bowden, and S. M. Howden. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Field Crops Research*. 85(2-3): 85-102
- Austin, R. B., M. A. Ford, and C. L. Morgan. 1989. Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. *The Journal of Agricultural Science* 112(3): 295-301.
- Austin, R. B., J. Bingham, R. D. Blackwell, L. T. Evans, M. A. Ford, C. L. Morgan, and M. Taylor. 1980. Genetic improvements in winter yields since 1900 and associated physiological changes. *The Journal of Agricultural Science*. 94(3): 675-689.
- Banco de México. 2015. Balanza de productos agropecuarios. <http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadroAnalitico&idCuadro=CA186&sector=1&locale=es> consulta: 1/10/2015.
- Benítez, R. I.; A. G. López, S. A. Hernández y G. J. Molina. D. 1991. Rendimiento potencial de variedades de trigo liberadas en México en diferentes épocas. *Agrociencia serie Fitociencia* 2(2): 39-51.
- Blum, A. 2011. *Plant Breeding for water-limited environments*. Springer. NY, USA. 267 p.
- Blum, A., and A. Ebercon. 1981. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*. 21:43-47.
- 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 Research*. 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 Research* 22: 289-296.
- Borlaug, N. E. 1954. Mexican wheat production and its role in the epidemiology of stem rust in North America. *Phytopathology* 44:398-404.
- Borlaug, N. E. 1968. Wheat breeding and its impacts on world food. Proceedings of the Third International Wheat Genetics symposium. Australian Academy of Science. Canberra 5-9 August. Pp. 1-36.
- Borlaug, N. E. 1970. La Revolución Verde, paz y humanidad. Conferencia en ocasión de la entrega del Premio Nobel de la Paz en Oslo, Noruega.
- Borlaug, N. E. 1986. Accomplishments in maize and wheat productivity. CIMMYT. México, D. F. 30 p.
- Borlaug, N. E. y J. A. Rupert. 1949. Métodos que pueden aumentar la producción de trigo en México. Folleto de divulgación No. 4. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México.
- Calderini, D. F., and G. A. Slafer. 1999. Has yield stability changed with genetic improvement of wheat yield?. *Euphytica* 107:51-59.
- Camacho, C. M. A. y colaboradores. 1980. Descripción de las variedades desarrolladas por el CIANO: Trigo, triticale, cebada, maíz, soya, cártamo, ajonjolí, y garbanzo. Patronato para la Investigación y Experimentación Agrícola del Estado de Sonora. SARH, INIA, CIANO. Publicación especial CIANO No.39.
- Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. 2014. Indicadores del Trigo en México. En línea: <http://www.canimolt.org/del-campo-al-molino> consulta: 1/10/2015.

Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. 2015. Crecientes importaciones trigueras. La Jornada del Campo. Suplemento Informativo de la Jornada. 21 de marzo 2015. Número 90. En línea: <http://www.jornada.unam.mx/2015/03/21/cam-trigueras.html> consulta: 1/10/2015\_

CANIMOLT. 2012. Estadísticas y tendencias de la industria molinera en México. 7° Simposio Internacional del trigo. Mazatlán, 2012. En línea. <http://trigomexico.wordpress.com/> consulta: 1/10/2015.

Cárdenas, L. 1935. Informe del General Lázaro Cárdenas al abrir el Congreso sus sesiones ordinarias el 1 de septiembre de 1935. En: Los presidentes de México ante la Nación: informes, manifiestos y documentos de 1821 a 1966. Editado por la XLVI Legislatura de la Cámara de Diputados. Tomo 4. Informes y respuestas desde el 30 de noviembre de 1934 hasta el 1 de septiembre de 1966. <http://lanic.utexas.edu/larrp/pm/sample2/mexican/history/4/6603142.html> consulta: 2/10/2015.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. Report on wheat improvement. CIMMYT. El Batán, Mexico.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 2012. Sustainable modernization of the traditional agricultura. MasAgro, SAGARPA, CIMMYT. En línea: <http://masagro.mx/index.php/en/components-en/wheat-yield-consortium>. consulta: 22/08/2015.

Comisión Nacional del Agua. 2006. Formulación del Programa Hídrico por Organismo de Cuenca, Visión 2030, de la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico. Integración del Programa Hídrico Regional. En línea:

<http://www.conagua.gob.mx/OCLSP07/NotaP/FINALaaResumenEjecutivo.pdf>

consulta: 1/09/2015.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Análisis de alternativas para el uso sustentable de agua en el mediano y largo plazos. En línea: [www.cmic.org/.../gagan -  
\\_Presentacion para Consejo Consultivo](http://www.cmic.org/.../gagan_-_Presentacion_para_Consejo_Consultivo) consulta: 1/09/2015.

Comisión Nacional del Agua. 2012a. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa I Península de Baja California. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2012b. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa II Noroeste. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2012c. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2012d. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2012e. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2013. Estadísticas del Agua en México. Edición 2013. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2014. Numeragua México, 2014. SEMARNAT. México, D. F.

Comisión Nacional del Agua. 2015a. Alertamiento de sequía. En línea: <http://www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=4&n2=21>. consulta: 15/09/15.

- Comisión Nacional del Agua. 2015b. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Diario Oficial. Segunda Sección. Poder Ejecutivo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 20 de abril de 2015.
- Dalrymple, D. G. 1986. Development and spread of high-yielding wheat varieties in developing countries. Bureau of Science and Technology. Agency for International Development. Washington, D. C. 99 p.
- Dencic, S., R. Kastori, B. Kobiljski, and B. Duggan. 2000. Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica* 113(1): 43-52.
- Doyle, A. D., and R. A. Fischer. 1979. Dry matter accumulation and water use relationships in wheat crops. *Australian Journal of Agricultural Research* 30(5): 815-829.
- Dreccer, M. F., M. G. Borgognone, F. C. Ogonnaya, R. M. Trethowan, and B. Winter. 2007. CIMMYT-selected derived synthetic bread wheats for rainfed environments: yield evaluation in Mexico and Australia. *Field Crops Research* 100(2-3): 218-228.
- El-Rawy, M. A., and M. I. Hassan. 2014. Effectiveness of drought tolerance indices to identify tolerant genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology* 17(4): 255-266.
- Figuroa, L. P., D. G. Fuentes, H. V. Valenzuela, V. G. Chávez, F. J. L. Félix, L. J. L. Mendoza, and F. Onavas. 2009, variedad de trigo harinero para el Noroeste de México. INIFAP. Folleto técnico No. 86. Cd. Obregón, Sonora, México.

- Figueroa-López, P., G. Fuentes-Dávila, V. Valenzuela-Herrera, G. Chávez-Villalba, J. L. Félix-Fuentes y J. A. Mendoza-Lugo. 2013. Ónavas F2009, cultivar de trigo harinero para el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(1): 175-179.
- Fischer, R. A. and G. O. Edmeades. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Science* 50: S-85-S-98.
- Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science* 105: 447-461.
- Fischer, R. A. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I: Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29(5):897-912.
- Fischer, R. A. and P. C. Wall. 1976. Wheat breeding in Mexico and yield increases. *The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* 42:139-148.
- Fischer, R. A. and J. T. Wood. 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars. III Yield associations with morpho-physiological traits. *Australian Journal of Agricultural Research* 30: 1001-1020.
- Fischer, R. A., D. Rees, K. D. Sayre, Z-M. Lu, A. G. Condon, and A. Larque-Saavedra. 1998. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Science* 38(6): 1467-1475.
- Foulkes, M. J., J. W. Snape, V. J. Shearman, M. P. Reynolds, O. Gaju, and R. Sylvester-Bradley. 2007. Genetic progress in yield potential in wheat recent advances and future prospects. *Journal of Agricultural Science* 145(1): 17-29.
- Frank, A. B., J. F. Power, and W. O. Willis. 1973. Effect of temperature and water stress on photosynthesis, diffusion resistance and leaf water potential in spring wheat. *Agronomy Journal* 65: 777-780.

- Frederick, J. R., and P. J. Bauer. 1999. Physiological and numerical components of wheat yield. *In*: Satorre, E. H., and G. A. Slafer, (eds.). *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. Food Product Press. The Haworth Press. USA. Pp. 45-66
- Fuente, P. J. L. 2015. En entrevista. Crecientes importaciones trigueras. La Jornada del Campo. Suplemento Informativo de la Jornada. 21 de marzo 2015. Número 90. En línea: <http://www.jornada.unam.mx/2015/03/21/cam-trigueras.html> consulta: 4/09/2015.
- Gaona, R. A. L. y A. Barahona E. 2001. La introducción de la Genética en México: la Genética aplicada al mejoramiento vegetal. *Asclepio* LIII: 23-44.
- García del Moral, L. F., Y. Rharrabti, D. Villegas, and C. Royo. 2003. Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under mediterranean conditions. *Agronomy Journal* 95: 266-274.
- Gourjdji, S. M., K. L. Mathews, M. Reynolds, J. Crossa, and D. B. Lobell. 2013. An assessment of wheat yield sensitivity and breeding grains in hot environments. *Proceedings of the Royal Society B* 280:20122190.
- Guarda, G., S. Padovan, and G. Delogu. 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy* 21:181-192.
- Guendouz, A., M. Djoudi, S. Guessoum, K. Maamri, A. Hannachi, Z. Fellahi, and M. Hafsi. 2014. Genotypic and phenotypic correlations among yield and yield components in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under different water treatments in eastern Algeria. *Annual Research and Review in Biology* 4(2): 432-442.

- Gupta, N. K., S. Gupta, and A. Kumar. 2001. Effect of water stress on physiological attributes and their relationships with growth and yield of wheat cultivars at different stages. *Journal of Agronomy & Crop Science*. 186(1): 55-62.
- Guttieri, M. J., J. C. Stark, K. O'Brien, and E. Souza. 2001. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit. *Crop Science*. 41:327-335.
- Hanson, H., N. E. Borlaug, and R. G. Anderson. 1982 *Wheat in the third world*. International Maize and Wheat Improvement Center. Westview Press. USA. 174 p.
- Heisey, P. W., M. A. Lantican, and H. J. Dubin. 2002. Empirical evidence of gains in yields and other characteristics. In: *Impacts of international wheat breeding research in developing countries, 1966-97*. Mexico, D. F. CIMMYT. Pp. 47-56.
- Hellin, J., B. Shiferaw, J. E. Cairns, M. Reynolds, I. Ortiz-Monasterio, M. Banziger, K. Sonder, and R. La Rovere. 2012. Climate change and food security in the developing world: potential of maize and wheat research to expand options for adaptation and mitigation. *Journal of Development and Agricultural Economics* 4(12): 311-321.
- Hernández, C. M. E.; L. A. Torres T. y G. Valdez M. 1995. *Sequía meteorológica*. Instituto Nacional de Ecología. México.  
[http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/publicaciones/cambio\\_climatico/sequia.pdf](http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/publicaciones/cambio_climatico/sequia.pdf)  
consulta: 20/10/2015.
- Hernández, S. A. 1984. Antecedentes del mejoramiento genético del trigo en México. *Germen* 2(1):32-45.
- Hernández, S. A. 1988. Avance en el mejoramiento genético del trigo en México. *Agronomie, EDP Sciences* 8(7): 633-638.

- Hochman, Z. 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in semi-arid environment. *Field Crops Research* 5:55-67.
- Hodson, D. P. and J. W. White. 2009. Climate change: what future for wheat?. In: Dixon, J., H-J. Braun, P. Kosina, and J. Crouch (eds.). *Wheat facts and futures*. CIMMYT. México, D. F. Pp. 52-61.
- Hossain, A., J. A. Teixeira da Silva, M. V. Lozovskaya, and V. P. Zvolinsky. 2012. High temperatura combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in South-Eastern Russia: I. Phenology and growth. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 19(4):473-487.
- Huerta-Espino, J., H. E. Villaseñor-Mir, E. Espitia-Rangel, E. Solís-Moya, and M. van Ginkel, M. The history of wheat breeding in Mexico. 2011. In: Bonjean, A. P., W. J. Angus, and M. van Ginkel. (eds.). *The world wheat book 2: A History of wheat breeding*. Vol. 2 Lavoisier Publishing. France. Pp. 275-308.
- Hurd, E. A. 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agricultural Meteorology* 14: 39-55.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2015. El cambio climático en México. Información por estado y por sector: [http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo\\_sector/estados/futuro\\_guanajuato.html](http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_guanajuato.html) consulta: 25/09/2015.
- Instituto Nacional de Ecología. 2007. Mexico's third national communication to the United Nations framework convention on climate change. Ministry of Environmental and Natural Resources. Mexico.

- Isidro, J., F. Álvaro, C. Royo, D. Villegas, D. J. Miralles, and L. F. García del Moral. 2011. Changes in duration of developmental phases of durum wheat caused by breeding in Spain and Italy during the 20th century and its impact in yield. *Annals of Botany* 107(8): 1355-1366.
- Jager, K., A. Fabian, M. Rakszegi, and B. Barnabas. 2011. Effect of drought on grain development in wheat. *Agrisafe Final Conference Climate Change: challenges and opportunities in agriculture*. Pp 179-182.
- Jiang, Y., and B. Huang. 2001. Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrass in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. *Crop Science*. 41: 436-442.
- Jiménez, V. M. A. 1990. La Fundación Rockefeller y la investigación agrícola en América Latina. *Comercio Exterior*. 40(10): 968-975.
- Jockovic, B., N. Mladenov, N. Hritov, V. Acin, and I. Djalovic. 2014. Interrelationship of grain filling rate and other traits that affect the yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Romanian Agricultural Research* 31:81-87.
- Johnson, D. E. 2000. *Métodos Multivariados aplicados al análisis de datos*. Internacional Thomson Editores. Soluciones Empresariales México.
- Johnson, R. R., and D. N. Moss. 1976. Effect of water stress on  $^{14}\text{CO}_2$  fixation and translocation in wheat during grain filling. *Crop Science* 16(5):697-701.
- Kaur, V., and R. K. Behl. 2010. Grain yield in wheat as affected by short periods of high temperature, drought and their interaction during pre- and post- anthesis stages. *Cereal Research Communications*. 38(4):514-520.

- Kilic, H., and T. Yagbasanlar. 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 38(11):164-170.
- Kobata, T., J. A. Palta, and N. C. Turner. 1992. Rate of development of post-anthesis water deficit and grain filling of spring wheat. *Crop Science*. 32(5):1238-1242.
- Koocheki, A. R., A. Yazdanehpas, U. Mahmadyorov, and M. R. Mehrvar. 2014. Physiological-based selection criteria for terminal drought in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*. 16:1043-1053.
- Kronstad, W. E., and N. H. Scott. 1992. Utilization of winter x spring gene pools in wheat breeding and its implication in widening genetic variability. *In: I Conferencia nacional trigo '88. Memoria Tomo I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México.*
- Kumar, S., S. Kumar-Sehgal, U. Kumar, P. V. Vara-Prasad, A. Kumar-Joshi, and B. Singh-Gill. 2012. Genomic characterization of drought tolerance-related traits in spring wheat. *Euphytica*. 186(1): 265-276.
- Lantican, M. A., P.L. Pingali, and S. Rajaram. 2001. Growth in wheat yield potential in marginal environments. *In: Proceedings of the Warren E. Kronstad Symposium. Reeves, J., A. McNab, and S. Rajaram (eds.). CIMMYT. Sonora, México. pp. 73-79.*
- Liu, C., Z. Yang, and Y-G. Hu. 2015. Drought resistance of wheat alien chromosome addition lines evaluated by membership function value based on multiple traits and drought resistance index of grain yield. *Field Crops Research* 179(1):103-112.

- Lobell, D. B., J. I. Ortiz-Monasterio, G. P. Asner, P. A. Matson, R. L. Naylor, and W. P. Falcon,. 2005. Analysis of wheat yield and climate trends in Mexico. *Field Crops Research*. 94: 250-256.
- Lonbani, M., and A. Arzani. 2011. Morpho-physiological traits associated with terminal drought-stress tolerance in triticale and wheat. *Agronomy Research*. 9(1-2): 315-329.
- Lopes, M. S., M. P. Reynolds, M. R. Jalal-Kamali, M. Moussa, Y. Feltaous, I. S. A. Tahir, N. Barma, M. Vargas, Y. Mannes, and M. Baum. 2012b. The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research*. 128:129-136.
- Lopes, M. S., M. P. Reynolds, Y. Manes, R. P. Singh, J. Crossa, and H. J. Braun. 2012a. Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “Historic” set representing 30 years of breeding. *Crop Science*. 52(3):1123-1131.
- Madani, A., A. S. Rad, A. Pazoki, G. Nourmohammadi, and R. Zarghami. 2010. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grain filling and dry matter partitioning responses to source:sink modifications under postanthesis water and nitrogen deficiency. *Acta Scientiarum Agronomy* 32(1):145-151.
- Magaña, V., Méndez-Méndez, R. Morales y C. Millán. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. In: *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J. y A. Fernández-Bremauntz (compiladores) con la colaboración de P. Osnaya. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. pp. 203-213.

- Majid, S. A., R. Asghar, and G. Murtaza. 2007. Yield stability analysis conferring adaptation of wheat to pre- and post-anthesis drought conditions. *Pakistan Journal of Botany* 39(5):1623-1637.
- Manes, Y., H. F. Gomez, L. Puhl, M. Reynolds, H. J. Braun, and R. Trethowan. 2012. Genetic yield gains of the CIMMYT international semi-arid wheat yield trials from 1994-2010. *Crop Science* 52:1543-1552.
- Márquez, F. 1977. *Sistemas de producción agrícola (agroecosistemas)*. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Martínez-Martínez, E. 2014. Anuncia SAGARPA exportación de dos MDT de trigo a países africanos. Puertos, Transporte y Carga. Por Barradas, R. Agosto 14. En línea. <http://www.ptc.mx/2014/08/anuncia-sagarpa-exportacion-de-dos-mdt-a-trigo-a-paises-africanos/> consulta: 26/10/2015.
- MasAgro. 2014. MasAgro por la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola sustentable de México. Enlace. Diciembre 2013-enero 2014. Año V No. 17: 3-6.
- McCaig, T. N. 1996. Temperature and precipitation effects on durum wheat grown in southern Saskatchewan for fifty years. *Canadian Journal of Plant Science* 77(2):215-223.
- Méndez, G. J., J. Nívar Ch., y V. González O. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 65: 38-55.
- Mendoza, V. M., E. E. Villanueva, y L. E. Maderey. 2004. Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el cambio climático global. In: *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J. y A. Fernández-Bremauntz

- (compiladores) con la colaboración de P. Osnaya. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. pp. 215-226.
- Miller, T. D. 1992. Growth stages of wheat: identification and understanding improve crop management. Better crops with plant food. Potash & Phosphate Institute. 655 Engineering Drive, Suite 110, Norcross, GA.
- Miralles, D. J., S. D. Katz, A. Colloca, and G. A. Slafer. 1998. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. *Field Crops Research*. 59(1): 21-30.
- Moetamadi, S. A., P.M. Mohammadi, G. R. Bakhshi-Khaniki, and R. A. Karimizadeh. 2015. Assessment of correlation and path analysis in wheat under drought stress. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 6(5): 178-183.
- Molina G. J. D. 1992. Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia). AGT editor. México D. F. 349 p.
- Moreno, G. R. 1992. Obtención de variedades de trigo para siembras de temporal. *In: I Conferencia nacional trigo '88. Memoria Tomo I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México.*
- Moreno, G. R. y B. M. Álvarez. 1983. Obtención de variedades de trigo de temporal zona centro. Centro de Investigaciones Agrícolas de la Mesa Central. Campo Agrícola Experimental Valle de México. INIA. Folleto Misceláneo No. 1.
- Moreno, G. R. y M. H. E. Villaseñor. 1993. Trigo de temporal. 195-211 p. *In: Producción y genotecnia de plantas autógamias. Márquez, S. F. editor. AGT Editor, S. A. México.*

- Motzo, R., F. Giunta, and G. Pruneddu. 2010. The response of rate and duration of grain filling to long-term selection for yield in Italian durum wheats. *Crop and Pasture Science* 61(2):162-169.
- Munns, R., and R. A. Richards. 2007. Recent advances in breeding wheat for drought and salt stresses. 565-585. *In: Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops*. M. A. Jenks et al. editors. Springer.
- Muñoz, O. A. 1980. Resistencia a la sequía y mejoramiento genético. *Ciencia y Desarrollo*. 33, 26-35.
- Muñoz, O. A., and O. J. L. Rodríguez. 1988. Models to evaluate drought resistance. 741-743. *In: Unger, P. W., T. V. Sneed, W. R. Jordan, and R. Jensen, (eds.). Challenges in dryland agriculture. A global perspective. International Conference of Dryland Farming. August 19-24. Texas Agricultural Experimental Station, U.S.A.*
- Nakhforoosh, A., H. Grausgruber, H-P. Kaul, and G. Bodner. 2015. Dissection of drought response of modern and underutilized wheat varieties according to Passioura's yield water framework. *Frontiers in Plant Science*. 6(570):1-13.
- Nalley, L. L., A. P. Barkley, and A. M. Featherstone. 2010. The genetic and economic impact of the CIMMIYT wheat breeding program on local producers in the Yaqui Valley, Sonora Mexico. *Agricultural Economics*. 41:453-462.
- Nelson, G. C., M. W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Velmonte-Santos, M. Ewing, and D. Lee. 2009. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. *Food Policy Report 21*. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute Pp. 2-19.

- Nicolas, M. E., R. M. Gleadow, and M. J. Dalling. 1985a. Effect of post-anthesis drought on cell division and starch accumulation in developing wheat grains. *Annals of Botany* 55(3): 433-444.
- Nicolas, M. E., R. J. Simpson, H. Lambers, and M. J. Dalling. 1985b. Effects of drought on partitioning of nitrogen in two wheat varieties differing in drought-tolerance. *Annals of Botany*. 55(5): 743-754.
- Nyakatawa, E. Z., and Mugabe, F. T. 1995. Assessment of tolerance to reduced irrigation of six genotypes in the Southeast lowveld of Zimbabwe. 316-319. In: The Ninth Regional Wheat Workshop for Eastern, Central and Southern Africa. Addis Ababa, Ethiopia, October 2-6. Tanner, D; Payne, T.; Abdalla, O. S. editors. CIMMYT/CIDA Eastern Africa Cereals Program and CIMMYT/EU Eastern Africa & SADC Wheat Programs.
- Okuyama, L. A., L. C. Federezzi, and J. F. Barbosa-Neto. 2005. Plant traits to complement selection base on yield components in wheat. *Ciência Rural*. 35 (5): 1010-1018.
- Olivares-Villegas, J. J., M. P. Reynolds, and G. K. McDonald. 2007. Drought-adaptive attributes in the Seri/Babax hexaploid wheat population. *Functional Plant Biology*. 34: 189-203.
- Ortiz-Monasterio, R. J. I., S. S. Dhillon, and R. A. Fischer. 1994. Date of sowing effects on grain yield and yield components of irrigated spring wheat cultivars and relationships with radiation and temperature in Ludhiana, India. *Field Crops Res*. 37:169-184.

- Ortiz, R., R. Trethowan, G. Ortiz F., M. Iwanaga, J. H. Dodds, J. H. Crouch, J. Crossa, and H-J. Braun. 2007. High yield potential, shuttle breeding, genetic diversity, and a new international wheat improvement strategy. *Euphytica* 157(3): 365-384.
- Ortoll, S. 2003. Orígenes de un proyecto agrícola: la Fundación Rockefeller y la Revolución Verde. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* 4(1): 81-96.
- Paknejad, F., M. Nasri, H. R. T. Moghadam, H. Zahedi, and M. J. Alahmadi. 2007. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *Journal of Biological Sciences* 7(6): 841-847.
- Pingali, P. L., and S. Rajaram. 1999. Part 1: Global wheat research in a changing world: options for sustaining growth in wheat productivity. *In: Global wheat research in a changing world: challenges and achievements*. Pingali, P. L. editor. CIMMYT. Mexico, D. F.
- Pleijel, H., A. B. Eriksen, H. Danielsson, M. Bondesson, and G. Selldén. 2006. Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar-grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomal conductance. *Environmental and Experimental Botany* 56(1): 63-71.
- Prasad, P. V. V., S. R. Pisipati, I. Momcilovic, and Z. Ristic. 2011. Independent and combined effects of high temperature and drought stress during grain filling on plant yield and chloroplast EF-Tu expression in spring wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 197: 430-441.
- Rajaram, S. 1989. Mejoramiento de trigo para obtener tolerancia a la sequía: perspectivas y opiniones. 149-162. *In: Mejoramiento de la resistencia a la sequía en trigo: Memoria del taller*. Mohan, K. M editor. CIMMYT.

- Rajaram, S. 1995. Wheat germplasm improvement: historical perspectives, philosophy, objectives, and missions. *In: Wheat breeding at CIMMYT: commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement.* Rajram, S. and Hetell, G. P. editors. Wheat Special Report No. 29. CIMMYT. Mexico, D. F.
- Rajaram, S., and A. I. Morgouov. 1995. Wheat germplasm improvement at CIMMYT Mexico. *In: Wheat breeding: objectives, methodology, and progress: Proceedings of the Ukraine-CIMMYT Workshop.* Wheat program special report No. 37. Morgounov, A. I.; Vlasenko, V. A.; McNab, A.; and H. –J Braun, editors. June 12-14, 1995. Mexico, D. F. CIMMYT.
- Rajaram, S. and M. van Ginkel. 1997. Wheat breeding methodology: international perspectives. 265-279 p. *In: The ninth regional wheat workshop for Eastern, Central and Southern Africa.* Tanner, D. G.; Payne, T. S.; Abdalla, O. S. editors. Addis Ababa, Ethiopia. CIMMYT.
- Rajaram, S., N. E. Borlaug, and M. van Ginkel. 2002. CIMMYT international wheat breeding. *In: Bread wheat improvement and production.* Curtis, B. C.; Rajaram, S; Gómez Macpherson, H. editors. FAO. Plant Production and Protection Series No.30. Rome.
- Rajaram, S., W. H. Pfeiffer, R. P. Singh, G. Bekele, L. Gilchrist, and O. Abdalla. 1988. Bread Wheat. *In: CIMMYT report on wheat international 1985-86.* CIMMYT. Mexico, D. F.
- Rajaram, S., W. H. Pfeiffer, R. P. Singh, and G. A. Briceño. 1992. Futuras actividades de mejoramiento de trigo harinero del CIMMYT para las regiones de México que cuentan con riego. *In: I Conferencia nacional trigo '88. Memoria Tomo I.* Secretaría de

Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México.

- Rajaram, S., R. P. Singh, and E. Torres. 1988. Approaches in breeding for rust resistance. *In: Breeding strategies for resistance to the rust of wheat*. Simmonds, N. W and S. Rajaram, technical editors. Mexico D. F. CIMMYT. Rebetzke, G. J.; Ellis, M. H.; Bonnett, D. G.; Condon, A. G.; Falk, D.; Richards, R. A. 2011. The Rht13 dwarfing gene reduces peduncle length and plant height to increase grain number and yield of wheat. *Field Crop Research* 124: 323-331.
- Rajput R. P., M. R. Deshmukd, and V. K. Paradkar. 1987. Accumulated heat units and phenology relationships in wheat as influenced by planting dates under late sown conditions. *Journal of Agronomy & Crop Science* 159:345-348
- Reynolds, M. P., Y. Manes, and G. Rebetzke. 2012. Aplicación de la fisiología en el fitomejoramiento para estrés por calor y sequía. pp 18-32. *In: Fitomejoramiento fisiológico I: Enfoques interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo*. Reynolds, M.; Pask, A.; Mullan, D.; Chávez, P. editores. México, D. F. CIMMYT.
- Reynolds, M. P., A. Pask, A. Torres, Y. N. Quinche, G. Molero, S. Sukumaran, P. Figueroa, E. Solís, J. Ireta, A. Borbón, J. L. Alvarado, N. C. D. Barma, O. I. Joarder, I. K. Kalappanavar, S. V. P. Sukaru, V. K. Mishra, B. Arun, G. P. Singh, V. S. Sohu, N. R. Guatam, R. R. Puri, M. Y. Mujahid, R. Ward, M. R. Jalal-Kamali, Z. He, M. G. Mossad, L. Sharma, R. Chatrath, G. S. Mavi, M. Hussain, A. Firoz-Ahmad, M. G. Rahman, Ahmad, M. Dastfal, A. R. Nikzad, S. M. Tabib-Ghaffary, M. Khodarahmi, M. Abdal Hakim, and A. K. Joshi. 2015. Pre-breeding for yield potential: summary of

- International Data 2nd WYCYT and performance of pipeline material. *In: Proceedings of the International TRIGO (Wheat) Yield Potential Workshop 2015.* Reynolds, M. P.; Molero, G. ; Braun, H. editors. CENEB, CIMMYT, Cd. Obregón, Sonora, Mexico, 24-26 March 2015. Mexico, D. F. CIMMYT.
- Reynolds, M. P., R. M. Trethowan, M. van Ginkel, and S. Rajaram. 2001. Application of physiology in wheat breeding. *In: Application of physiology in wheat breeding.* Reynolds, M. P.; Ortíz Monasterio, J. J.; McNab, A. editors. Pp 2-10. México, D. F. CIMMYT.
- Reynolds, M., D. Bonett, S. C. Chapman, R. T. Furbank, Y. Manes, D. E. Mather, and M. A. J. Parry. 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *Journal of Experimental Botany.* 62(2): 439-452.
- Reynolds, M., F. Dreccer, and R. Trethowan. 2007. Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *Journal of Experimental Botany* 58(2): 177-186.
- Richards, R. A., A. G. Condon, and G. J. Rebetzke. 2001. Traits to improve yield in dry environments. *In: Application of physiology in wheat breeding.* Reynolds, M. P., J. J. Ortíz-Monasterio, A. McNab (eds.). México, D. F. CIMMYT. Pp 2-10.
- Rodríguez, V. J. 1992. Importancia del trigo en la producción de alimentos en México. *In: I Conferencia nacional trigo '88. Memoria Tomo I.* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México.

- Rodríguez, V. J. 1990. México y su agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México.
- Rodríguez, V. J. 2000. Principios del mejoramiento del trigo en México, 1939-1955. *Agricultura Técnica en México*. 26 (1): 99-107.
- Rosales-Serna, R., J. Kohashi-Shibata, J. A. Acosta-Gallegos, C. Trejo-López, J. Ortiz-Cereceres, and J. D. Kelly. 2004. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. *Field Crops Research* 85: 203-211.
- Saeedipour, S. 2012. Appraisal of some physiological traits in two wheat cultivars subjected to terminal drought stress during grain filling. *African Journal of Biotechnology* 11(83):14884-14888.
- SAGARPA, Comité Nacional Sistema-Producto. FIRCO, COLPOS. 2010. Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. Informe. En línea. [http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios\\_promercado/GRANOS.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/GRANOS.pdf) consulta: 25/10/2015.
- Saini, H. S., and D. Aspinall. 1981. Effect of water deficit on sporogenesis in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Annals of Botany* 48(5): 623-633.
- Saint Pierre, C., J. L. Crossa, D. Bonnett, K. Yamaguchi-Shinozaki, and M. Reynolds. 2012. Phenotyping transgenic wheat for drought resistance. *Journal of Experimental Botany* 1-10.

- Salazar, G. M., R. O. Moreno, S. A. Hernández, and C. E. Rodríguez. 1993. Trigo de riego. *In*: Márquez, S. F. (ed.). Producción y genotecnia de plantas autógamas. AGT Editor, S. A. México. Pp. 161-182.
- Sánchez, P. V., J. J. Flores V. y V. H. Santoyo C. 1984. La integración agricultura-industria en la producción de trigo y harina en el sur de Sonora. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sayre, K. D., S. Rajaram, and R. A. Fischer. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in Northwest Mexico. *Crop Science* 37(1): 36-42.
- Segovia, L. A., L. M. Serrano C., J. D. Molina G., y I. Benítez R. 1991. Comparación de ambientes de selección en trigo (*Triticum aestivum*). *Agrociencia serie Fitociencia*, 2 No. 2, abril-junio, 53-67.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2015. Producción Agropecuaria y Pesquera. En línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> consulta: 29/10/2015.
- Shah, N. H., and G. M. Paulsen. 2003. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis of wheat. *Plant and Soil* 257:219-226.
- Shah, N. H., and G. M. Paulsen. 2005. Injury to photosynthesis and productivity from interaction between high temperature and drought during maturation of wheat. *Asian Journal of Plant Sciences* 4(1):67-74.
- Shamsi, K., and S. Kobraee. 2011. Bread wheat production under drought stress conditions. *Annals of Biological Research* 2(3):352-358.

- Sharma, R. C., J. Crossa, G. Velu, J. Huerta-Espino, M. Vargas, T. S. Payne, and P. G. Singh. 2012. Genetic gains for grain yield in CIMMYT spring bread wheat across international environments. *Crop Science* 52(4):1522-1533.
- Shimishi, D., M. L. Mayoral, and D. Atsmon. 1982. Responses to water stress in wheat and related wild species. *Crop Science* 22:123-128.
- SIAP. 2014. Atlas Agroalimentario, 2014. SAGARPA. En línea: <http://www.siap.gob.mx/atlas2014/index.html> consulta: 1/11/2015
- Siddique, K. H. M., R. K. Belford, M. W. Perry, and D. Tennant. 1989b. Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 40(3):473-487.
- Siddique, K. H. M., E. J. M. Kirby, and M. W. Perry. 1989a. Ear: stem ratio in old and modern varieties: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Research* 21:59-78.
- Sikuku, P. A., G. W. Netondo, D. M. Musyimi, and J. C. Onyango. 2010. Effects of water deficit on days to maturity and yield of three NERICA rainfed rice varieties. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 5(3):1-9.
- Singh, R. P., E. J. Huerta, and H. M. William. 2005. Genetics and breeding for durable resistance to leaf and stripe rust in wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 29:121-127.
- Singh, R. P., J. Huerta-Espino, R. Sharma, A. K. Joshi, and R. Trethowan. 2007. High yielding spring bread wheat germplasm for global irrigated and rainfed production systems. *Euphytica* 157:351-363.

- Sojka, R. E., L. H. Stolzy, and R. A. Fischer. 1981. Seasonal drought response of selected wheat cultivars. *Agronomy Journal* 73: 834-844.
- Solís, M. E., M. Hernández-Martínez, A. Borodanenko, J. L. Acuña A., and O. A. Grajeda, C. 2004. Duración de la etapa reproductiva y el rendimiento de trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27(4): 323-332.
- Solís, M. E., J. Huerta E., H. E. Villaseñor M., P. Pérez H., A. Ramírez R., L. Ledesma R., y M. L. de la Cruz G. 2013. Luminaria F2012 nueva variedad de trigo harinero para riego restringido en El Bajío. INIFAP. Folleto técnico No. 21.
- Solís, M. E., J. Huerta E., H. E. Villaseñor M., P. Pérez H., A. Ramírez R., L. Ledesma R. y M. L. de la Cruz G. 2013. Luminaria F2012. Nueva variedad de trigo harinero para riego restringido en El Bajío. Folleto Técnico No. 21. INIFAP, Fundación Produce Guanajuato A. C., Grupo Bimbo. Celaya, Gto.
- Solís-Moya, E., P. Figueroa-López, G. Molero, M. P. Reynolds, M. A. Camacho-Casas, J. Ireta-Moreno, A. Borbón-Gracia, and J. L. Alvarado-Padilla. 2015. Evaluation of the WYCYT in five irrigated wheat growing locations in Mexico. In: Reynolds, M. P., G. Molero, and H. Braun (eds.). *In: Proceedings of the International TRIGO (Wheat) Yield Potential Workshop 2015*. CENEB, CIMMYT, Cd. Obregón, Sonora, Mexico, 24-26 March 2015. Mexico, D. F. CIMMYT.
- Suaste, F. M. P., V. M. Zamora V., M. H. Reyes V., H. E. Villaseñor M., A. Santacruz V. y E. Solís M. 2015. Agrupamiento de genotipos de la colección nacional de trigo en base a genes de interés agronómico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(4): 695-706. INIFAP. Estado de México, México.

- Sukumaran, S., M. P. Reynolds, M. S. Lopes, and J. Crossa. 2015. Genome-wide association mapping for adaptation to agronomic density: a component of high yield potential in wheat. In: Reynolds, M. P., G. Molero, and H. Braun (eds.). *In: Proceedings of the International TRIGO (Wheat) Yield Potential Workshop 2015*. CENEB, CIMMYT, Cd. Obregón, Sonora, Mexico, 24-26 March 2015. Mexico, D. F. CIMMYT.
- Taheri, S., J. Saba, F. Shekari, and T. Lee Abdullah. 2011. Effects of drought stress condition on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum*) lines. *African Journal of Biotechnology* 10(80): 18339-18348.
- Trethowan, R. M., M. van Ginkel, and S. Rajaram. 2002. Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global affected environments. *Crop science* 42:1441-1446.
- van Ginkel, M. 1999. Bread wheat breeding for yield under drought conditions. Chapter 4. *In: Rajaram, S. and Hettel, G. P. editors. Wheat breeding at CIMMYT: commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement. Wheat Special Report No. 29*. CIMMYT. Mexico, D. F.
- van Ginkel, M., D. S. Calhoun, G. Gebeyehu, A. Miranda, C. Tien-you, R. Pargas Lara, R. M. Trethowan, K. Sayre, J. Crossa, and S. Rajaram. 1998. Plant traits related to yield of wheat in early, late, or continuous drought conditions. *Euphytica* 100(1): 109-121.
- Villareal, R. L. 1995. Expanding the genetic base of CIMMYT bread wheat germplasm. In: Rajram, S., and G. P. Hettel (eds.). *Wheat breeding at CIMMYT: commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement.. Wheat Special Report No. 29*. CIMMYT. Mexico, D. F.

- Villaseñor, M. E. H. 2000. Reseña del programa de mejoramiento genético de trigo para temporal en México. *Agricultura Técnica en México*. 26 (1): 109-123.
- Villaseñor, M. H. E. y Rajaram, S. 1998. Estrategia para la evaluación de líneas de trigo para áreas de temporal y liberación de nuevas variedades. In: XVII Congreso de Fitogenética Acapulco '98. SOMEFI, UAG, INIFAP.
- Villaseñor, M. H. E. y E. Espitia R. 2000. Mejoramiento genético de trigo para temporal. In: El trigo de temporal de México. Libro técnico No. 1. SAGAR, INIFAP, CEVAMEX. Chapingo, Estado de México. 187 p
- Villaseñor, M. H. E., E. Espitia R. y J. Huerta E. 2003. Variedades de trigo recomendadas para siembras de temporal en los Valles Altos de México. 60 años de investigación al servicio de México 1943-2003. Memoria técnica no. 6. Campo Experimental Valle de México "El Horno". INIFAP.
- Villaseñor, M. H. E., E. Espitia R., J. Huerta E. y A. Salazar Z. 1999. Tlaxcala F2000, Náhuatl F2000, Juchi F2000, Rebeca F2000, nuevas variedades de trigo harinero para siembras de temporal en México. INIFAP. Desplegable técnica No.8. Chapingo, México.
- Villaseñor, M. H. E., J. Huerta E. P. Pérez H., M. F. Rodríguez G., E. Martínez C., R. Hortelano S. R. y E. Espitia R. 2009. La investigación de trigo en el Campo Experimental Valle de México: historia y aportaciones. Reseña histórica, 66 años de investigación al servicio de México, 1943-2009. Campo Experimental Valle de México "El Horno". Publicación especial no. 1. INIFAP. SAGARPA.
- Villaseñor, M. H. E., A. Limón O., J. Huerta E., P. Pérez H. y J. Ochoa B. 2008. Nana 2007, nueva variedad de trigo harinero para siembras de temporal. Memoria

CEVAMEX. Memoria Técnica No. 9. 65 años de investigación científica en México. 8ava Expo Nacional de Maquinaria Agrícola. INIFAP. Chapingo, México.

Villaseñor-Mir, H. E., E. Espitia-Rangel, y J. Huerta-Espino. 2004. History and contributions of the CEVAMEX wheat research programme. Wheat research programme of INIFAP's Valle de Mexico Experimental Station. In: Agricultural research in "El Horno-CEVAMEX", an overview, Mexico. Where it all began. Special issue no. 2. INIFAP.

Villegas D., N. Aparicio, R. Blanco, and C. Royo. 2001. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat growth under Mediterranean conditions. *Annals of Botany* 88: 617-627.

Volke, H. V. y A. Turrent F. 1973. Efecto de la sequía sobre el rendimiento de grano y otras características agronómicas del trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo condiciones de invernadero. *Agrociencia* 14: 163-180.

Waddington, S. R., J. K. Ransom, M. Osmanzai, and D. A. Saunders D. A. 1986. Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to Northwest Mexico. *Crop Science* 26(4): 698-703.

Yang, J., J. Zhang, Z. Wang, Q. Zhu, and L. Liu. 2001. Deficit-induced senescence and its relationship to the pre-stored carbon in wheat during grain filling. *Agronomy Journal* 93:196-206.

You L., M. W. Rosegrant, S. Wood, and S. Dongsheng. 2009. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1009-1014.

Zarazúa, V. P. 2011. Evaluación del cambio climático y sus impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y agave de la Región Ciénega de Chapala (Análisis retrospectivo y análisis prospectivo). Tesis doctoral. Centro Universitario de Ciencia Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara.

Zarei, B., A. Naderi, M. R. Jalal-Kamali, Sh. Lack, and A. Modhej. 2013. Determination of physiological traits related to terminal drought and heat stress tolerance in spring wheat genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 5(21):2511-2520.

## 8. APÉNDICE

**Cuadro 1A. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables por genotipos y por cada localidad.**

Variedad	Celaya			Montecillo		
	RG	GPMC	BIO	RG	GPMC	BIO
Kentana 48	2597.9gh	8833.1f	3416.0fghi	4763.2ef	13744ef	4673.8cdef
Chapingo 48	3401efg	11626.5e	3379.2fghi	3639f	11592f	3729.5f
Yaktana 54C	2136.5h	7813.3f	2835.0i	4756.3ef	13707ef	3973.2ef
Lerma Rojo	3739.1def	12311.2cde	3459.0efghi	6519.3bcd	19009abcd	5558.7abcd
Lerma Rojo S64	4126.1de	13871.6bcde	3301.9ghi	5618.7cde	17185bcde	4276.2ef
Siete Cerros	3856.8def	13970.6abcde	3711.1cdefgh	6578.1bcd	20756ab	5726.7abc
Salamanca S75	5396.4b	14071.5abcde	3945.0bcdefg	6560.3bcd	15424de	4438.9def
Pavón F76	3890.6def	14570.6abc	3547.1defghi	5513.3de	17196bcde	4483.8def
Seri M82	3120.3fg	11716.4de	2997.5hi	6891.6bcd	19938abc	4785.9cdef
Temporalera M87	5374.5b	13730.5bcde	4278.2abcde	6143.7bcde	13730ef	5110.6bcde
Baviacora M92	4239.1cd	13361.5bcde	4190.6bcdef	9065.3a	21939a	6522.0a
Cortázar S94	5034.4bc	12483.0cde	3859.1bcdefg	5707.6bcde	13663ef	4132.7ef
Roelfs F2007	4396.4cd	14044.9abcde	4347.0abcd	7188.3b	18648abcd	5440.5abcd
Nana F2007	5678.1ab	15282.9ab	4436.2abc	7115.1bc	16705cde	5052.8cde
Bacorehuis F2015	5422.4b	14271.9abcd	4547.9ab	6991.4bcd	15568de	4822.5cdef
Borlaug 100 F2014	6261.5a	16526.3a	5102.8a	8932.4a	21530a	6245.0ab

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), RG= rendimiento de grano  $\text{kg ha}^{-1}$ , GPMC= granos por metro cuadrado, BIO= biomasa aérea  $\text{g m}^{-2}$ .

**Cuadro 2A. Comparación de medias<sup>1</sup> de las variables por genotipos considerando los cuatro ambientes a la vez.**

Variedad	AP	DE	DM	NEE	PHL
Kentana 48	113.47a	86.69a	127.31cd	15.84fg	73.19g
Chapingo 48	96.8c	80.31e	120.66j	15.24g	73.52g
Yaktana 54C	94.08cd	85.25b	128.66bc	16.94cd	71.64h
Lerma Rojo	108.76b	83.06cd	125.41ef	15.42g	76.31bcd
Lerma Rojo S64	88.07ef	80.50e	122.88hi	16.41def	75.20def
Siete cerros	85.62fg	84.81b	129.19b	17.34bc	74.17fg
Salamanca S75	80.18h	75.94f	123.19ghi	16.72cde	73.24g
Pavón F76	89.89def	85.00b	128.69bc	16.19ef	74.78ef
Seri M82	81.59gh	87.19a	129.14b	18.51a	73.48g
Temporalera M87	97.52c	80.06e	124.41fg	16.56de	75.88cde
Baviacora M92	91.13de	86.56a	132.39a	16.97cd	75.05ef
Cortázar S94	79.71h	75.31f	122.17ij	17.41bc	69.97i
Roelfs F2007	91.83de	84.06bc	129.06b	16.41def	75.16ef
Nana F2007	97.15c	79.44e	124.02fgh	17.75b	76.65abc
Bacorehuis F2015	93.39cd	82.62d	126.55de	16.14ef	76.96ab
Borlaug 100 F2014	91.04de	82.81d	128.03bcd	17.03cd	77.41a

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), AP= altura de planta en cm, DE= días a espigamiento, DM= días a madurez, NEE= número de espiguillas por espiga, PHL= peso hectolítrico kg hL<sup>-1</sup>.

**Cuadro 2A. Continuación. Comparación de medias de las variables por genotipos considerando los cuatro ambientes a la vez.**

Variedad	RG	BIO	GPMC
Kentana 48	3680.6g	4044.9efg	11288.5h
Chapingo 48	3520g	3554.3gh	11609.3gh
Yaktana 54C	3446.4g	3404.1h	10760.4h
Lerma Rojo	5129.2ef	4508.8cde	15660.2cd
Lerma Rojo S64	4872.4f	3789.0fgh	15528.3d
Siete cerros	5217.4ef	4718.9cd	17363.1abc
Salamanca S75	5978.3bcd	4191.9def	14747.6def
Pavón F76	4701.9f	4015.5efgh	15883.2cd
Seri M82	5005.9f	3891.7efgh	15827.2cd
Temporalera M87	5759.1cde	4694.4cd	13730.3ef
Baviacora M92	6652.2b	5356.3ab	17650.2ab
Cortázar S94	5371.0def	3995.9efgh	13073.0fg
Roelfs F2007	5792.3cde	4893.7bc	16346.5bcd
Nana F2007	6396.6bc	4744.5bcd	15994.1bcd
Bacorehuis F2015	6206.9bc	4685.2cd	14920.1de
Borlaug 100 F2014	7596.9a	5673.9a	19028.4a

<sup>1</sup>Según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), RG= rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup>, GPMC= granos por metro cuadrado, BIO= biomasa en g m<sup>-2</sup>.