



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

VARIACIÓN EN RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES, Y DENSIDAD DE RAÍCES EN TRIGO BAJO CONDICIONES DE HUMEDAD RESIDUAL EN SAN CRISTÓBAL SUCHIXTLAHUACA, OAXACA

MIRANDA DOMÍNGUEZ LUIS EDUARDO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

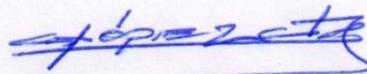
2015

La presente tesis titulada: **Variación en rendimiento y sus componentes, y densidad de raíces en trigo bajo condiciones de humedad residual en San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca**, realizada por el alumno: **Luis Eduardo Miranda Domínguez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



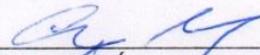
DR. CÁNDIDO LÓPEZ CASTAÑEDA

ASESOR



DR. IGNACIO BENÍTEZ RIQUELME

ASESOR



DR. JOSÉ APOLINAR MEJÍA CONTRERAS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

**RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES, Y DENSIDAD RADICAL EN TRIGO BAJO
CONDICIONES DE HUMEDAD RESIDUAL EN SAN CRISTÓBAL
SUCHIXTLAHUACA, OAXACA**

Miranda-Domínguez Luis Eduardo M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

El trigo (*Triticum aestivum* L.), triticale (*Triticosecale* Wittmack) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), se cultivan en riego y temporal o secano en México. El cultivo en condiciones de secano se realiza en la temporada de lluvias en verano-otoño y en otoño-invierno con humedad residual, después de la temporada de lluvias, con severos problemas de sequía terminal. El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la variabilidad en el rendimiento de grano (RG) y sus componentes, y densidad radical (DR) en trigo, cebada y triticale, bajo condiciones humedad residual en Oaxaca, México, en otoño-invierno 2013. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió de cuatro surcos de 4 m de longitud y 0.4 m de separación. Se fertilizó con una dosis de 40-40-00. En promedio, cebada produjo mayor RG, biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), granos espiga⁻¹ (G E⁻¹) y peso de 100 granos (P100G) que trigo, y mayor RG, IC y P100G que triticale. La cebada Cleopatra produjo el más alto RG, debido a un mayor IC, granos m⁻² (G M⁻²), G E⁻¹, P100G y un ciclo biológico más corto. El criollo 'Venturero' produjo mayor RG, debido a un mayor IC, espigas m⁻² (E M⁻²), P100G, peso hectolítrico y un ciclo biológico más largo. La mayor (DR) se concentró cerca de la superficie del suelo (20 cm) en todos los genotipos; la DR fue mayor en trigo que en cebada y triticale entre los 20 y 100 cm de profundidad. El trigo 'Venturero' tuvo mayor DR que los demás cultivares, desde la superficie del suelo hasta los 100 cm de profundidad. Los genotipos de cebada y trigo con mayor densidad de raíces produjeron mayor rendimiento de grano.

Palabras clave: *Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L., *Triticosecale* Wittmack, biomasa aérea final, índice de cosecha.

GRAIN YIELD AND ITS COMPONENTS, AND ROOT DENSITY IN WHEAT UNDER RAINFED CONDITIONS IN SAN CRISTOBAL SUCHIXTLAHUACA, OAXACA.

Miranda-Domínguez Luis Eduardo M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

Bread wheat (*Triticum aestivum* L.), triticale (*Triticosecale* Wittmack) and barley (*Hordeum vulgare* L.) crops are grown under irrigation and rainfed conditions in Mexico. The cultivation of these cereals crops is carried on during the rainfall period in the summer-fall season and in the fall-winter season, after the rainfall period, depending on the soil moisture retention and experiencing severe problems of terminal water stress. The present research work was conducted to study variability in grain yield (GY) and its components, and root density (RD) in bread wheat, triticale and barley under soil moisture retention content in Oaxaca, Mexico in the fall-winter growing season 2013. A complete randomized block design with four replicates was used. The experimental unit consisted of four rows 4 m long and 0.4 m wide. A fertilization rate of 40-40-00 was used at sowing. Barley had higher GY, final aerial biomass (BM), harvest index (HI), grains spike⁻¹ (G S⁻¹), and 100 grain-weight (100GW) than bread wheat, and higher GY, HI, and 100GW than triticale. Cleopatra, a barley genotype had the highest GY and this was due to a high HI, grains m⁻² (G M⁻²), G S⁻¹, 100GW and a shorter biological cycle. ‘Venturero’, a landrace of bread wheat had higher GY than the other bread wheat genotypes and this was due to a high HI, spikes m⁻² (S M⁻²), 100GW, test weight (TW) and a longer biological cycle. The highest RD concentrated near the soil surface (20 cm) for all genotypes; bread wheat RD was higher than triticale and barley RD from 20 cm down to 100 cm depth. ‘Venturero’ had higher RD than all the other bread wheat genotypes from the soil surface down to 100 cm depth. Barley and bread wheat genotypes with higher RD had greater GY.

Key words: *Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L., *Triticosecale* Wittmack, final aerial, biomass, harvest index.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y a su planta docente, en especial a los profesores que me compartieron sus conocimientos.

A los miembros del Consejo Particular: Dr. Cándido López Castañeda, Dr. Ignacio Benítez Riquelme y Dr. José Apolinar Contreras Mejía por la cuidadosa revisión del presente trabajo.

A los trabajadores Juan Raymundo Espinosa Alvarado y Fidel Romero Pérez, por su disposición para el trabajo.

Un agradecimiento especial a mis compañeros que me acompañaron en este trayecto, en especial a Jarely e Isabel; Marisol, Benjamín, Jazmín, Rosa Ma., Javier, Celia, Eucario, y a tantos más que tuve la fortuna de conocer en el Colegio.

A la secretaria Sandra López Yescas, por el apoyo durante mi transcurso de mi formación académica.

A mi familia por confiar y apoyarme siempre, en especial agradezco a Luis Romeo Miranda Martell, Carmen Domínguez Pérez y a Gael Miranda Domínguez.

DEDICATORIA

A mi madre Carmen Domínguez Pérez, por ser la mujer más trabajadora, a la que admiro y amo.

A mi padre Luis Romeo Miranda Martell, por los consejos y apoyo

A mis hermanos Mari y Rodrigo por llevarnos mejor y darme ánimos

A mi bebe Gael Miranda, por ser un motivo de lucha y felicidad.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Producción de trigo en temporal en Oaxaca	3
2.2 Efecto de la sequía en el rendimiento de grano y sus componentes	3
2.3 Efecto de la sequía en crecimiento y desarrollo.....	6
2.4 Efecto de la sequía en el crecimiento y densidad de raíces.....	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 Localización.....	14
3.2 Material genético	14
3.3 Detalle experimental	16
3.4 Variables medidas	16
3.5 Datos meteorológicos.....	18
3.6 Contenido de humedad edáfica.....	18
3.7 Análisis estadístico.....	18
4. RESULTADOS	19
4.1 Variación en temperatura del aire, lluvia y contenido hídrico del suelo.....	19
4.2 Análisis de varianza	21
4.3 Comparación entre especies.....	22
4.3.1 Rendimiento y sus componentes.....	22
4.3.2 Densidad de raíces	24
4.4 Comparación entre épocas de variedades de trigo	26
4.4.1 Rendimiento y sus componentes.....	26
4.4.2 Densidad de raíces	27
4.5 Comparación entre genotipos.....	29
4.5.1 Rendimiento y sus componentes.....	29
4.5.2 Densidad de raíces	31
5. DISCUSIÓN	34

5.1 Variación en temperatura del aire, lluvia y contenido hídrico del suelo.....	34
5.2 Comparación entre especies.....	35
5.2.1 Rendimiento y sus componentes.....	35
5.2.2 Densidad de raíces	37
5.3 Comparación entre épocas de variedades de trigo	37
5.3.1 Rendimiento y sus componentes.....	37
5.3.2 Densidad de raíces	39
5.4 Comparación entre genotipos.....	40
5.4.1 Rendimiento y sus componentes.....	40
5.4.2 Densidad de raíces	41

LISTA DE CUADROS

Página

- Cuadro 1.** Genotipos de trigo, triticale y cebada utilizados en el experimento. 15
- Cuadro 2.** Grados libertad y significancia de los cuadrados medios para los factores de variación del diseño experimental, para el rendimiento de grano y sus componentes, etapas fenológicas, y altura de planta, determinadas en el experimento en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014. 21
- Cuadro 3.** Grados libertad y significancia de los cuadrados medios para los factores de variación del diseño experimental, para densidad de raíces en las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, determinadas en el experimento en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014. 22
- Cuadro 4.** Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m⁻² (E M-2), granos m⁻² (G M-2), granos por espiga (G E-1), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las especies de cebada, criollo ‘Venturero’, triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014. 24
- Cuadro 5.** Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm), para las especies de cebada, criollo ‘Venturero’, triticale y trigo en condiciones de secano, 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014. 25

Cuadro 6. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m-2 (E M-2), granos m-2 (G M-2), granos por espiga (G E-1), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las épocas de variedades de trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.	27
Cuadro 7. Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) para un subgrupo de genotipos de trigos antiguos, modernos y el trigo ‘Venturero’ en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.....	28
Cuadro 8. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m-2 (E M-2), granos m-2 (G M-2), granos por espiga (G E-1), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las variedades de cebada, triticale, criollo ‘Venturero’ y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.	30
Cuadro 9. Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) para las variedades de cebada, triticale, criollo ‘Venturero’ y trigo en condiciones de secano, ciclo Otoño-invierno, 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.	32

LISTA DE FIGURAS

Página

- Figura 1.** Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada durante el experimento. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. 2013-2014. S=Siembra (05- Octubre-2015), A=Antesis y MF=Madurez fisiológica. 19
- Figura 2.** Contenido hídrico edáfico en las profundidades de 0-20 (a), 20-40 (b), 40-60 (c) y 60- 80 cm (d) bajo humedad residual. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. 2013-2014. CC= Capacidad de campo; PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; S=Siembra, A=Antesis y MF=Madurez fisiológica. 20
- Figura 3.** Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para las especies de cebada, criollo ‘Venturero’, triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014. 26
- Figura 4.** Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para un subgrupo de genotipos de trigos antiguos, modernos y el criollo ‘Venturero’ en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014. 29
- Figura 5.** Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para las variedades de cebada, triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014. 33

1. INTRODUCCIÓN

En México, el trigo (*Triticum aestivum* L.) se cultiva en un área aproximada de 563,000 ha bajo riego en el ciclo invierno-primavera en Sonora y Baja California (83 %) y en seco o temporal, en el verano-otoño (17 %) en los estados de Tlaxcala, Nuevo León, Oaxaca, Guanajuato, México, Zacatecas, Baja California, Jalisco y Puebla (SAGARPA, 2013). El rendimiento de grano promedio nacional en condiciones de riego es de 6 t ha⁻¹, mientras que en temporal es de apenas 1.7 t ha⁻¹ (SAGARPA, 2013); debido principalmente a la variación en cantidad y distribución de la lluvia. De manera específica, las deficiencias hídricas tienen efectos severos cuando coinciden con las etapas de floración y llenado del grano (Kirby y Appleyard, 1984). Lo que reduce significativamente el rendimiento y calidad del grano (López-Castañeda, 1996). Entre las estrategias que utilizan para disminuir el efecto de las deficiencias hídricas en el rendimiento de grano, además de los caracteres genético-fisiológicos que contribuyen al rendimiento de grano como por ejemplo; el índice de cosecha, el número de espigas m⁻² y peso de doscientos granos (López-Castañeda, 2013). La biomasa aérea acumulada en los tallos de la planta al momento de la antesis y una mayor removilización de reservas del tallo al grano (López-Castañeda y Richards, 2001; López-Castañeda, 2013). Bajo condiciones limitantes de humedad, las raíces juegan un papel muy importante con respecto a la estabilidad del rendimiento por la absorción efectiva de agua del suelo (Nakhforoosh *et al*, 2014). El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo estudiar la variabilidad genética en rendimiento de grano y sus componentes, y la densidad, y profundidad del sistema radical en un grupo de variedades mejoradas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (antiguas y modernas Mexicanas, y una variedad criolla o ‘Venturero’) y además de un triticale (*Triticosecale* Wittmack), en condiciones de humedad residual en el ciclo otoño-invierno (‘Venturero’) en la Mixteca Alta Oaxaqueña, bajo la hipótesis

de que las variedades mejoradas para condiciones de secano tienen mejor comportamiento agronómico y mayor densidad de raíces que las variedades criollas, bajo condiciones de estrés hídrico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción de trigo en temporal en Oaxaca

El trigo en el estado de Oaxaca se cultiva en dos estaciones de crecimiento, la de primavera-verano principalmente en condiciones de temporal en una superficie de 14,141 ha con un rendimiento promedio de 0.84 t ha^{-1} ; y la de otoño-invierno o humedad residual con 691 ha con un rendimiento promedio de 0.62 t ha^{-1} ; de manera puntual en la población de San Cristóbal Suchixtlahuaca, se sembraron 131 ha, lo que corresponde al 19 % de la superficie sembrada a nivel estado bajo condiciones de humedad residual con un rendimiento medio de 0.36 t ha^{-1} , mientras que en el ciclo primavera-verano se siembra una superficie de 244 ha y con un rendimiento de 0.31 t ha^{-1} (SAGARPA, 2013). En las siembras de humedad residual predomina la utilización de germoplasma criollo denominado 'Venturero', cuyo origen viene desde la colonia en México; y se caracteriza por presentar plantas altas de ciclo largo y amplia adaptación a las variaciones termo-pluviométricas, características de los ambientes con sequía terminal (Legaria y Muñoz, 1992).

2.2 Efecto de la sequía en el rendimiento de grano y sus componentes

Las deficiencias hídricas al final del ciclo del cultivo del trigo y otros cereales menores son comunes en diversas regiones del mundo; en el sureste de Australia, el déficit hídrico no es un factor limitante antes de la floración, pero su presencia durante el periodo de llenado del grano, puede causar reducciones significativas en el rendimiento y calidad del grano; en estas condiciones de humedad se ha determinado que la cebada produjo 25 % mayor rendimiento de grano que trigo harinero, trigo duro, triticale y avena, y que este mayor rendimiento de grano se debió a una mayor producción de biomasa aérea que a un mayor índice de cosecha; la biomasa

aérea de cebada fue 22, 16, 13 y 2 % mayor que en trigo duro, avena, trigo harinero y triticale, respectivamente (López-Castañeda y Richards, 1994a).

Las deficiencias hídricas en ambientes de secano con sequía terminal, tienen efectos negativos en el rendimiento de grano y sus componentes; Laing y Fischer (1977), observaron que las variedades semi-enanas de trigo, produjeron mayor rendimiento de grano en condiciones de alta y baja humedad, que la variedades de porte alto; el alto rendimiento bajo condiciones de sequía de algunas variedades de trigo semi-enanas en relación a las más altas, están probablemente relacionadas a su alto potencial de rendimiento, asociado a un alto índice de cosecha y una reducción de la estatura (Aguilar y Fisher, 1975; Laing y Fischer, 1977). Otros estudios en condiciones de invernadero, mostraron que cuando el trigo creció en condiciones de estrés hídrico en etapas iniciales de desarrollo produjo buen rendimiento en diferentes tipos de suelos, pero cuando las plantas fueron sometidas a sequía en las etapas finales de desarrollo, el rendimiento fue más bajo en los suelos de textura limosa; el efecto del estrés hídrico terminal fue menor en el suelo arcilloso, debido a que la alta tensión hídrica en este tipo de suelo, resultó en una mejor distribución de la humedad, durante el periodo crítico; las plantas que crecieron bajo estrés hídrico en etapas iniciales de desarrollo utilizaron menos humedad, pero fueron igualmente eficientes en producción de grano que aquellas que crecieron en condiciones óptimas; las plantas con deficiencias hídricas durante las etapas de espigamiento y llenado de grano fueron menos eficientes en el uso de la humedad (Lehane y Staple, 1962).

Slafer y Andrade (1993), observaron que bajo condiciones de secano en Buenos Aires, Argentina, las variedades modernas produjeron mayor rendimiento de grano que los cultivares intermedios y antiguos; el alto rendimiento de grano estuvo estrechamente asociado al número de granos m^{-2} y éste mayor número de granos m^{-2} estuvo más asociado con diferencias en el número

de granos por espiguilla que con diferencias en algún otro componente. El número de granos espiga⁻¹, peso de 1000 granos y especialmente el rendimiento de grano, fueron más sensitivos al estrés por sequía que la altura de planta y el número de espiguillas por espiga en los cultivares, mientras que en los criollos éstos caracteres de la planta no difirieron bajo condiciones de estrés hídrico comparados al ambiente en condiciones óptimas de humedad; el promedio de rendimiento de los cultivares fue significativamente mejor que el promedio de rendimiento de los criollos bajo condiciones óptimas de humedad, así como bajo condiciones de estrés por sequía.

El análisis de coeficientes de sendero mostró que para los cultivares bajo condiciones óptimas de humedad no hubo asociación directa significativa de ninguno de los caracteres analizados con rendimiento, que bajo condiciones de sequía el número de granos por espiga tuvo un efecto positivo directo; bajo condiciones de sequía el número de espiguillas estériles presentó un efecto directo negativo, mientras el peso de grano por espiga tuvo un efecto directo positivo en el rendimiento; al utilizar un análisis conjunto jerárquico se pudo clasificar a los cultivares y los criollos de acuerdo a su habilidad para producir rendimiento bajo condiciones óptimas de humedad y condiciones de estrés por sequía, observando que entre los cultivares dos grupos de cinco genotipos y un criollo de un grupo de tres criollos, se caracterizaron por producir altos rendimientos en condiciones óptimas de humedad, así como bajo condiciones de estrés por sequía; se concluyó que éstos genotipos pueden servir como fuentes de germoplasma para el mejoramiento de la tolerancia a sequía (Denčić *et al.*, 2000).

Otros autores señalan que el potencial del rendimiento de trigo (*Triticum aestivum* L. y *T. turgidum* var. *durum*) se ha incrementado marcadamente en las décadas recientes, pero su impacto en la producción no ha sido bien documentado; en un estudio de la capacidad diferencial de rendimiento calculada para variedades populares de trigo con valores de una amplia base de

datos sobre su comportamiento en ensayos de rendimiento y ponderada por la combinación de cultivares en producción en cada estado, realizado en diferentes estados de la Unión Americana, se determinó que los incrementos en rendimiento fueron atribuidos al cambio de cultivar en combinación en los estados donde se cultiva trigo de primavera que variaron de 268 kg ha⁻¹ en Montana a 550 kg ha⁻¹ en Minnesota, y en trigos invernales de 193 kg ha⁻¹ en Montana a 416 kg ha⁻¹ en Nebraska, concluyendo que el impacto del mejoramiento genético fue inversamente proporcional a las limitaciones ambientales, que el mejoramiento substancial del rendimiento en condiciones desfavorables requiere mayor énfasis en resistencia al estrés y que no hay evidencia de una reducción en la tasa de mejoramiento del rendimiento (Feyerherm *et al.*, 1984).

2.3 Efecto de la sequía en crecimiento y desarrollo

El estrés hídrico reduce la estatura de la planta como consecuencia de una reducción en la acumulación de materia seca, tasa de asimilación neta, tasa relativa de crecimiento, aparición de hojas y macollos, y expansión del área foliar; Siddique *et al.* (1989a) determinaron que el intervalo del filocrón fue más corto en los cultivares modernos de trigo que en los antiguos, en condiciones de secano con sequía terminal en Merredin, Australia Occidental; también observaron que los cultivares antiguos produjeron más macollos por planta y menor porcentaje de macollos con espigas que los genotipos modernos, y que el índice de área foliar verde y la cobertura de los trigos antiguos fue mayor que la de los trigos modernos. Wang *et al.*, (2015) observaron que un déficit hídrico moderado en la etapa de crecimiento vegetativo en plantas de trigo, disminuyó el efecto de foto-inhibición en la hoja bandera causada por la sequía y el calor durante el periodo de llenado del grano; adicionalmente determinaron que en las plantas tratadas con déficit hídrico moderado, la sequía inhibió la fotosíntesis, principalmente a través de una

disminución en la tasa fotosintética máxima del transporte de electrones, mientras que la disminución en la eficiencia de la carboxilación limitó la fotosíntesis bajo condiciones de estrés por calor; la sequía durante la etapa vegetativa mejoró la tolerancia a ambos, la sequía y el estrés por calor, ocurridos durante el periodo de llenado del grano.

Las deficiencias hídricas en la etapa de pre-antesis retrasan el desarrollo fenológico, mientras que en la etapa de post-antesis, lo aceleran, y disminuyen la tasa relativa de crecimiento durante el periodo de estrés; los cultivares tolerantes a sequía mostraron un desarrollo radical vigoroso y/o baja relación parte aérea/raíz (Simane *et al.*, 1993); la sequía no redujo el número de granos, excepto en las espiguillas de la parte superior de la espiga donde la esterilidad fue 16 % mayor que en el testigo; el peso del grano en la madurez fisiológica fue 33 % más bajo en las plantas bajo sequía debido a una duración más corta y una menor tasa de crecimiento; el máximo número de gránulos grandes por endospermo se redujo 37 % bajo condiciones de sequía y esto se relacionó con un periodo corto de la iniciación de los gránulos grandes; el número de granos pequeños por endospermo difirió significativamente entre tratamientos de humedad al final de la división celular y para el día 37 después de la antesis había una reducción del 40 % en el número de gránulos pequeños bajo sequía en comparación con el testigo; la máxima cantidad de sacarosa por grano se alcanzó antes en los granos de las plantas bajo sequía (Nicolas *et al.*, 1985).

Otros trabajos de investigación en los que se estudiaron los efectos de la sequía en dos variedades de trigo de invierno (una tolerante a sequía y otra sensitiva a sequía), se observó una disminución en el tamaño de los embriones y el número de gránulos de almidón del tipo-A depositados en el endospermo, mientras que el desarrollo de las células de aleurona y la degradación de las capas de células que rodean al óvulo se aceleró significativamente en ambos genotipos; adicionalmente, el número de gránulos de almidón tipo-B por célula se redujo

significativamente; el estrés por sequía afectó la tasa de llenado del grano, acortó el llenado de grano y el periodo de madurez, y redujo severamente el rendimiento; la reducción en el tamaño de los embriones maduros fue significativamente mayor en el genotipo sensitivo que en genotipo tolerante; en los granos estresados del genotipo tolerante a sequía, la acumulación de cuerpos de proteína ocurrió significativamente antes que en la variedad sensitiva a sequía (Fabián *et al.*, 2011).

En experimentos de campo realizados en Australia Occidental en un año seco con riego y sin riego, y en un año húmedo se compararon tres cultivares de diferente altura de planta y potencial de rendimiento; se observó que los cultivares modernos Gutha (porte alto) y Kulin (semi-enano) produjeron mayor rendimiento de grano que el cultivar antiguo Gamenya (porte alto) en todos los ambientes, pero el porcentaje de reducción en rendimiento bajo condiciones de estrés fue mayor para los cultivares modernos (41, 34 y 23 %); también se observó que en el grano de Gamenya, el aumento en la actividad del ^{14}C después de iniciado el tratamiento de las plantas con ^{14}C fue la más alta bajo estrés hídrico; en general la pérdida de actividad del ^{14}C de la materia seca no estructural de los tallos fue menos que el incremento en la actividad del grano bajo condiciones de estrés hídrico, pero similar o mayor que el incremento en la actividad del grano bajo condiciones bien irrigadas; en promedio de ambientes y cultivares la materia seca no estructural almacenada en los tallos contribuyó al menos con 20 % de la materia seca del grano (Pheloung y Siddique, 1991).

En condiciones de secano con sequía terminal en el sureste de Australia, se determinó que la cebada alcanzó la madurez fisiológica 10 días antes que trigo, triticale y avena, y también alcanzó la iniciación floral y antesis en menor tiempo; estas diferencias en fenología se reflejaron en mayor rendimiento de grano y producción de biomasa aérea, y en menor tiempo que los otros

cereales; cebada y triticale desarrollaron una mayor área foliar y peso seco más rápido que trigo y avena; las diferencias en área foliar se establecieron cuando la primera hoja en el tallo principal alcanzó su máxima expansión; cebada también desarrolló las hojas del tallo principal y los macollos más rápido que las otras especies, mientras que triticale fue más lento en este respecto; la tasa de crecimiento del cultivo fue mayor en cebada y triticale hasta la antesis, pero estas diferencias no se reflejaron en la tasa relativa de crecimiento (López-Castañeda y Richards, 1994b). Otros estudios determinaron que los trigos modernos alcanzaron la iniciación floral, espiguilla terminal, antesis y madurez fisiológica en menor tiempo que las variedades antiguas, pero los cultivares modernos tuvieron una más larga duración entre la iniciación floral y la etapa de espiguilla terminal en condiciones de secano con sequía terminal en Merredin, Australia Occidental (Siddique *et al.*, 1989a, Loss *et al.*, 1989); Siddique *et al.*, (1989a) también indican que el rendimiento de grano y el índice de cosecha se incrementaron consistentemente de los cultivares antiguos a los modernos; el cultivar más reciente Kulin tuvo el más alto rendimiento de grano y segundo más alto índice de cosecha que el cultivar antiguo Purple Straw; el incremento del rendimiento de grano en los cultivares modernos estuvo asociado con el incremento en el número de granos por espiguilla y granos por espiga; el peso promedio del grano mostró una ligera reducción en los cultivares modernos. En condiciones similares de humedad se determinó que los trigos modernos tuvieron mayor cociente espiga/tallo que los trigos antiguos y que entre las líneas semi-enanas (Rht), las líneas enanas un mayor cociente espiga/tallo que las líneas altas (Siddique *et al.*, 1989b).

2.4 Efecto de la sequía en el crecimiento y densidad de raíces

La importancia del sistema radical para mantener el balance hídrico de la planta y como carácter de resistencia a sequía en cereales de grano pequeño, se ha reconocido a través de los años (Salim *et al.*, 1965), sin embargo, a la fecha son pocos los estudios realizados, para determinar los atributos de crecimiento radical que pueden contribuir a un mejor comportamiento agronómico y mayor rendimiento bajo condiciones de déficit hídrico. El estudio del crecimiento del sistema radical es importante porque las raíces de los cultivos anuales representan la mayor demanda de carbono, particularmente durante la etapa de crecimiento vegetativo inicial, cuando hasta un 50 % del carbono asimilado puede ser translocado a las raíces; la floración marca un cambio particularmente importante en la asignación de los asimilados, especialmente en determinadas especies con una asignación a las raíces considerablemente menor y dependiendo de las condiciones ambientales, esto podría resultar en una insuficiencia de asimilados para el mantenimiento de la planta (Gregory *et al.*, 1997).

Kramer (1969) sugirió que las características de raíces que una planta resistente a sequía debe tener son un sistema radical profundo, extenso y muy ramificado como el del sorgo, sin embargo, la conexión entre el rendimiento de grano y la cantidad de humedad utilizada por la planta apenas es perceptible, particularmente en un cultivo de grano, cuyo rendimiento depende de la cantidad de humedad utilizada y la etapa en que esta humedad es utilizada (Passioura, 1983). Las plantas de trigo en condiciones de campo producen típicamente tres o cuatro raíces seminales (aquellas que nacen de la semilla) que penetran profundamente en el subsuelo; sí la corona de la planta está en contacto con el suelo húmedo, ésta puede producir muchas raíces nodales o axilares, las que en cultivares de trigo de invierno (una estación de crecimiento larga) también penetrarán profundamente en el subsuelo, pero en una estación de crecimiento corta, las raíces

nodales del cultivo estarán ampliamente restringidas a una profundidad de 30 cm en el suelo (Passioura, 1983).

En general se considera que un sistema radical extensivo está asociado con la resistencia a sequía en trigo y que la selección por alto rendimiento de grano bajo condiciones de estrés hídrico debe hacerse por sistemas radicales más grandes; mientras que los fitomejoradores hayan seleccionado ocasionalmente consciente o inconscientemente por sistemas radicales extensivos, un programa de mejoramiento sistemático por caracteres deseables del sistema radical contribuirá a mayores rendimientos de grano bajo condiciones limitantes de humedad (Hurd, 1974).

El crecimiento de la planta y el rendimiento de grano son afectados por diferentes factores del suelo tales como la alcalinidad, sequedad, dureza, acidez,, salinidad, limitaciones de nutrientes y enfermedades del suelo; por lo tanto la identificación de variación genética para resolver algunos de estos problemas es importante, para el mejoramiento del crecimiento y el rendimiento de grano; un crecimiento rápido y profuso del sistema radical se cree que es importante para un buen crecimiento de la planta bajo la mayoría de condiciones adversas del suelo; un sistema radical con estas características se espera que extraiga más agua del suelo cuando éste está secándose, aumente la absorción de nutrientes, escape a algunas enfermedades de la raíz y sea competitivo con las malezas, resultando en más alto rendimiento; estas características deberán promover sistemas agrícolas más sustentables, al reducir las pérdidas de agua y nutrientes (Richards, 2008); no obstante, un rápido crecimiento del sistema radical no siempre es deseable porque en algunos ambientes limitantes de humedad, un crecimiento lento de la raíz y parte aérea, puede ser importante de tal forma que más humedad esté disponible para el llenado del grano (Passioura, 1972).

La variabilidad en caracteres de crecimiento de las raíces de trigo y otros cereales menores se ha estudiado en ambientes con diferente disponibilidad de humedad; p.e., en ambientes de tipo Mediterráneo con sequía terminal, se observó que la proporción de materia seca acumulada en la parte aérea decrece con la etapa de crecimiento y está relacionada con el patrón de desarrollo de la variedad; todas las variedades de trigo acumularon mayor cantidad de materia seca en la parte aérea que en las raíces después de la etapa de espiguilla terminal; además todas las variedades alcanzaron su máxima acumulación de materia seca y longitud de raíces antes de antesis (Siddique *et al*, 1990; Gregory *et al.*, 1992), mientras que la acumulación de la materia seca de la parte aérea continuó aumentando hasta la madurez fisiológica (Siddique *et al*, 1990).

López-Castañeda *et al.* (1994a), observaron que la cebada tiene mayor extensión y peso seco del sistema radical que trigo y triticale; el peso seco de raíces de cebada fue 35 % mayor que en los otros cereales; la mayor concentración de raíces se presentó en los primeros 15 cm de profundidad y decreció conforme se incrementó la profundidad del suelo. Chloupek *et al.* (2010) observaron que las variedades de cebada maltera con un sistema radical pequeño produjeron bajo rendimiento de grano y calidad de malta en condiciones de sequía, incluso en variedades genéticamente diversas.

Otros estudios relacionados con el tamaño del sistema radical en trigo mostraron que los genotipos modernos, poseen un sistema radical más pequeño que los trigos criollos antiguos y que un sistema de raíces más pequeño no conduce a una absorción óptima de agua y nutrientes, y un máximo rendimiento de grano, y que el tamaño óptimo de las raíces para rendimiento no ha sido investigado en trigo o la mayoría de los cultivos; estos estudios indican también que la utilización de la translocación del brazo corto del cromosoma 1 de centeno (1RS) y translocaciones foráneas similares, pueden incrementar significativamente la biomasa de las

raíces y el rendimiento de grano en condiciones de riego y secano, de tal forma que los caracteres de las raíces puedan integrarse en un análisis de los componentes del rendimiento en trigo (Waines y Ehdaie, 2007). Bajo condiciones controladas de humedad, la evasión de la deshidratación, vía la maximización de la absorción de agua, puede lograrse a través de una alta densidad de raíces cerca de la superficie del suelo, en éstas condiciones la capacitancia de las raíces puede ser un carácter útil en la selección *in situ* (Nakhforoosh *et al.*, 2014).

En un futuro se requerirán sistemas integradores para el estudio de caracteres cuantitativos complejos como la estabilidad del rendimiento de plantas bajo estrés hídrico y la investigación, deberá utilizar los recursos genómicos más modernos, combinando las nuevas tecnologías en genética cuantitativa, genómica y biomatemáticas, con un amplio conocimiento ecofisiológico de las interacciones entre el genotipo y el ambiente de crecimiento, y finalmente, el mejoramiento genético del cultivo (Parry *et al.*, 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización

Se estableció un experimento en condiciones de humedad residual en campo en la Comunidad de San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca (17°44' N y 97°19' O y 2,130 msnm) en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. Esta localidad se caracteriza por presentar un clima (BS1kw(w)(i')gw''), con verano cálido y seco, con una temperatura media anual de 15.8 °C y lluvia anual de 556 mm, concentrada en el verano y escasa en el invierno, y poca oscilación climática (García, 1988). El suelo presenta una textura arcillosa (2.4 % arena, 30 % limo y 67.6 % arcilla) en las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm, con valores promedio de: pH 7.9, contenido de nitrógeno total 0.048 %, materia orgánica 2.82 %, sodio 0.1 cmol kg⁻¹, potasio 0.47 cmol kg⁻¹, fósforo 0.07 ppm, conductividad eléctrica 0.47 dS m⁻¹ y densidad aparente 1.82 g cm⁻³, con una disminución en el contenido de estos nutrientes conforme a la profundidad en el perfil del suelo.

3.2 Material genético

Se utilizaron 20 genotipos de trigos harineros antiguos y modernos, y un criollo 'Venturero', tres genotipos de cebada y uno de triticale (Cuadro 1). Los genotipos de trigo incluyeron materiales antiguos como 'Gabo' y 'Marroqui', considerados como progenitores de la 'Revolución Verde'; 'Yaqui 50' un material criollo colectado en Valle del Yaqui, Sonora y algunos otros genotipos representativos de diferentes décadas; además de genotipos de cebada de seis hileras: Cleopatra y de dos hileras: Betzes y Lenetah, y el triticale experimental: triticale 118; los tres últimos genotipos fueron introducidos de la Universidad de California en Riverside, CA, Estados Unidos de Norte América.

Cuadro 1. Genotipos de trigo, triticale y cebada utilizados en el experimento.

Genealogía	Origen M-V-2010[§]	Peso de 100 (g)[§]	Año de liberación
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)			
Lenetah (Cebada 2 hileras)	V-47	4.31	-
Betzes (Cebada 2 hileras)	V-46	3.34	1957
Cleopatra (Cebada 6 hileras)	V-45	3.86	-
Triticale (<i>Triticosecale</i> Wittmack)			
Triticale 118 (Primavera)	V-48	2.48	2000
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)			
Criollos antiguos			
Gabo	V-3	2.86	1954
Marroqui	V-4	3.59	1948
Yaqui 50	V-5	2.87	1950
Criollo 'Venturero' (Testigo regional) [†]	-	3.31	-
Década de los 60			
Huamantla [†]	-	2.63	1959
Nainari 60	V-8	2.68	1960
Década de los 70			
Cleopatra VS-74	V-14	2.87	1974
Pavón F-76 [†]	-	3.49	1976
Salamanca S-75	V-16	3.37	1975
Década de los 80			
Gálvez M-87	V-27	3.47	1987
Temporalera M-87 [†]	-	3.26	1987
Década de los 90			
Verano S-91	V-29	3.28	1991
Borlaug M-95	V-30	2.63	1995
Romoga F-96	V-31	2.78	1996
Modernos			
Náhuatl F-2000	V-35	2.61	2000
Blanca Grande	V-39	2.76	2005
Rebeca F-2000	V-37	3.28	2000
Tlaxcala F-2000	V-34	2.69	2000
Líneas avanzadas			
VEE/5/SKH8/4/RRV/WW15/3/BJ//ON*3/BON ICW86 1034-300L-300AP-0L-5AP-0L-0AP (F ₆ , ICARDA, Siria)	V-42	3.86	-
Temp. M-87/Col. 1718 CPRST-13-12T (F ₄) (Espiga con aristas y alto número de espiguillas/espiga) [#]	V-40	2.16	2010
Temp. M-87/Col.1718 CPRST-13-13T (F ₄) (Espiga sin aristas y alto número de espiguillas/espiga) [#]	V-41	2.85	2010

[§]La multiplicación del germoplasma y datos del peso de 100 granos, obtenidos en el ciclo de verano 2010 en condiciones de secano en Montecillo, Texcoco, México; [†]Recolectados en la Comunidad de San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. [#]Genotipos de trigo obtenidos mediante selección individual, por el Dr. Cándido López Castañeda, Profesor Investigador Titular, Colegio de Postgraduados.

3.3 Detalle experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental consistió de cuatro surcos de 4 m de longitud, separados a 0.40 m. La siembra se realizó el día 5 de Octubre de 2014 en suelo con bajo contenido de humedad, depositando la semilla en el fondo del surco y cubierto con azadón. Se utilizó una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹ y se aplicó una dosis de fertilización de 40-40-00 al momento de la siembra, utilizando urea como fuente de nitrógeno y superfosfato de calcio triple como fuente de fósforo. Se aplicó un primer riego por gravedad a capacidad de campo (CC) cinco días después de la siembra (dds) y un segundo riego a los 20 dds; posteriormente el experimento se dejó a merced de la lluvia. Las malezas de hoja ancha y de hoja angosta se eliminaron mediante deshierbes manuales entre los 30 y 60 dds. No se observó la incidencia de plagas. Se registró la incidencia de roya de la hoja en la mayoría de las variedades de trigo desde el inicio de la emergencia de la espiga, la antesis y el llenado del grano.

3.4 Variables medidas

Número de días a antesis (DA): se determinó cuando el 50 % de las espigas en cada unidad experimental mostraban las anteras en dehiscencia.

Número de días a madurez fisiológica (MF): se determinó cuando el 80 % de los órganos aéreos de las plantas presentaban el color paja característico de cada genotipo.

Biomasa de la parte aérea final (BM, g m⁻²): se determinó al cosechar todos los tallos presentes en los surcos centrales de cada unidad experimental, para determinar su peso seco total y dividirlo entre el área cosechada.

Rendimiento de grano (RG, g m⁻²): se obtuvo al determinar el peso del grano después del desgrane de la muestra utilizada para determinar la biomasa aérea final.

Índice de cosecha (IC): se estimó al dividir el rendimiento de grano entre la biomasa (RG/BM).

Número de espigas M⁻² (E M⁻²): se determinó al contar el número total de tallos fértiles (NTF) con espiga y dividirlo entre el área cosechada.

Peso de 100 granos (P100g, g): se determinó al pesar 100 granos elegidos al azar en cada unidad experimental.

Número de granos por espiga (G E⁻¹): se determinó al contar y promediar el número de granos por espiga en 10 espigas completas de la muestra utilizada, para determinar la biomasa aérea final.

Número de granos M⁻² (G M⁻²): se calculó al multiplicar el número de espigas m⁻² por el número de granos por espiga (E M⁻² x G E⁻¹).

Altura de planta (AP, cm): se determinó al medir la longitud del tallo desde la superficie del suelo hasta la última espiguilla en la espiga en cinco plantas de cada unidad experimental.

Peso hectolítrico (PH, g mL⁻¹): se estimó como el cociente entre el peso (g) y el volumen (mL) de una muestra de 10 g de grano, tomada al azar del grano cosechado en cada unidad experimental.

Densidad de raíces (DR, cm cm⁻³): se determinó al contar el número de intersecciones entre fragmentos de raíz y las líneas horizontales, y verticales de una cuadrícula de 0.5 x 0.5 cm, y multiplicarlo por un factor de corrección (0.3928) (Tennant, 1975), para estimar la longitud de la raíz (cm) y dividirla entre el volumen de suelo de la muestra (cm³), obtenida en el perfil del suelo (cm³) (López-Castañeda y Richards, 1994a).

3.5 Datos meteorológicos

Los datos de temperatura máxima y mínima del aire se registraron diariamente con un termómetro de máxima y mínima (marca Taylor), a una distancia aproximada de 1 km del sitio experimental (Figura 1). La cantidad de lluvia acumulada semanalmente se determinó con un pluviómetro de acumulación semanal en el lugar en el que se estableció el experimento en campo (Figura 1).

3.6 Contenido de humedad edáfica

Se determinó el contenido hídrico aprovechable (HA) del suelo en las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm (Figuras 2a, 2b, 2c y 2d) semanalmente durante el experimento, utilizando el método gravimétrico y secando las muestras de suelo hasta peso constante; los datos del contenido de humedad se calcularon, al utilizar la siguiente ecuación:

$$\% HA = \frac{PSH - PSS}{PSS} \times 100$$

donde, PSH es el peso (g) de la muestra de suelo húmedo y PSS es el peso (g) de la muestra de suelo seco.

3.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para las variables determinadas, utilizando el programa SAS (2002) (Statistical Analysis System, Versión 9.0 para Windows), el factor genotipos (Cuadro 1) se desglosó en especies y dentro de la especie trigo, en épocas (Cuadro 2). Se calculó la diferencia mínima significativa (DMS, $P \leq 0.05$) para la comparación de medias.

4. RESULTADOS

4.1 Variación en temperatura del aire, lluvia y contenido hídrico del suelo

La temperatura máxima del aire se mantuvo entre los 18 y 31 °C durante el experimento, mientras que la temperatura mínima varió entre 0.4 y 16 °C con una tendencia a disminuir, al acercarse a la madurez fisiológica (Figura 1). La cantidad de lluvia registrada durante el ciclo fue 305 mm, de los cuales, el 55 % ocurrió en las primeras tres semanas después de la siembra y el restante 45 % se concentró durante la elongación del tallo (56 dds) y al inicio del periodo de llenado de grano (84 dds). Las altas temperaturas y la baja disponibilidad de lluvia registradas durante el ciclo, se reflejaron en síntomas severos de estrés hídrico en las plantas durante el desarrollo del experimento (Figura 1).

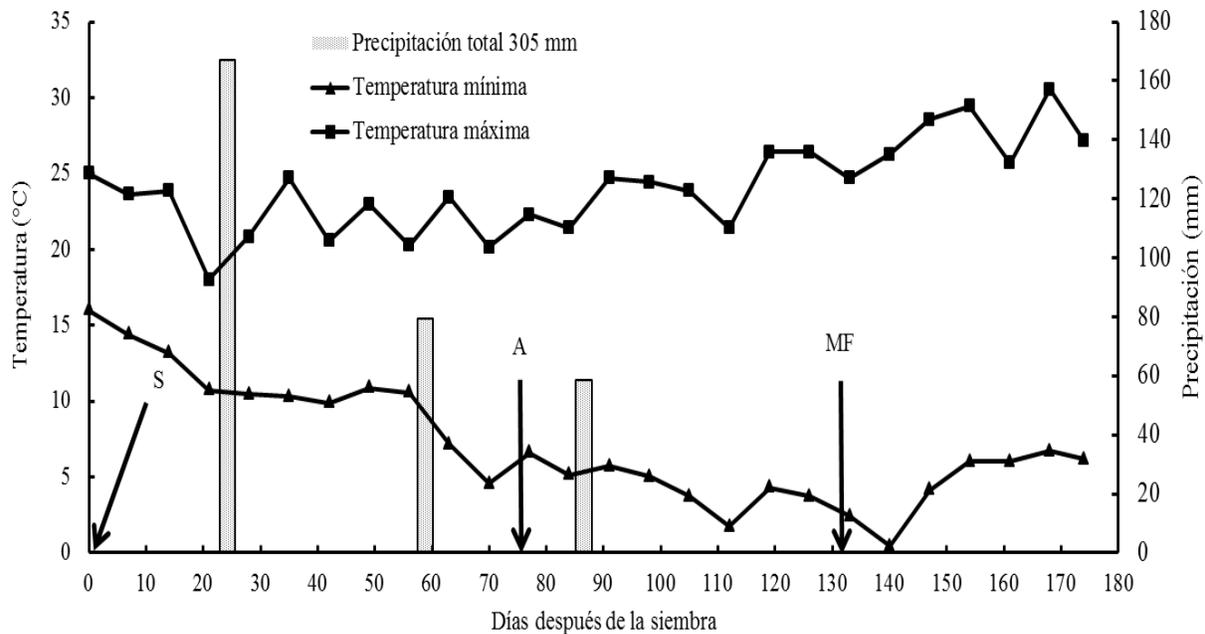


Figura 1. Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada durante el experimento. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. 2013-2014. S=Siembra (05-Octubre-2015), A=Antesis y MF=Madurez fisiológica.

En general el contenido hídrico del suelo fue inferior al porcentaje de marchitamiento permanente (PMP). Sin embargo, hubo dos eventos en los que el contenido hídrico del suelo fue mayor al PMP. En la profundidad de 0-20 cm el contenido hídrico edáfico alcanzó la capacidad de campo (CC) sólo durante el establecimiento del cultivo (18-25 dds) y superó al PMP durante la extensión del tallo (41-45 dds) (Figura 2a); este patrón de disponibilidad de humedad edáfica también se observó en las profundidades de 20-40 (Figura 2b) y 40-60 cm (Figura 2c); no así en la profundidad de 60-80 cm, donde el contenido hídrico edáfico se mantuvo por debajo del PMP (Figura 2d).

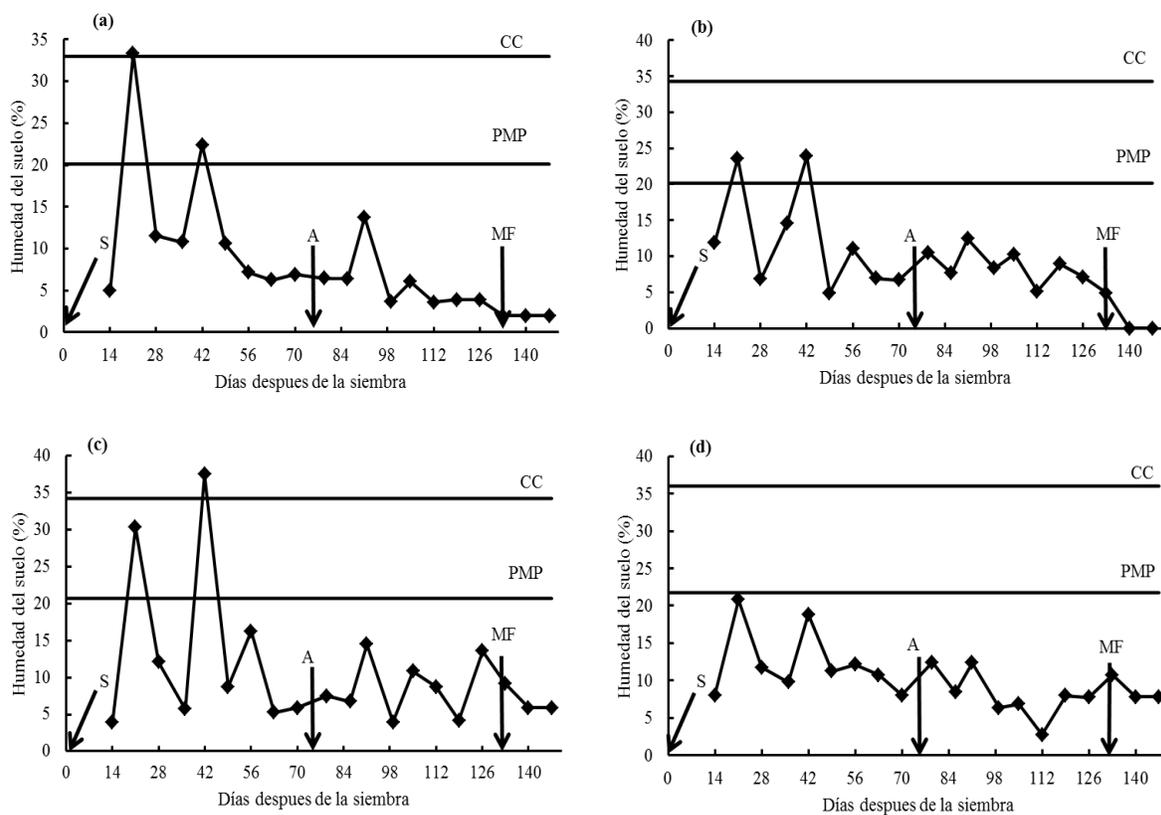


Figura 2. Contenido hídrico edáfico en las profundidades de 0-20 (a), 20-40 (b), 40-60 (c) y 60-80 cm (d) bajo humedad residual. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. 2013-2014. CC= Capacidad de campo; PMP= Porcentaje de marchitamiento permanente; S=Siembra, A=Antesis y MF=Madurez fisiológica.

4.2 Análisis de varianza

El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre genotipos para la mayoría de las variables analizadas, excepto para biomasa aérea final (BM) y número de espigas m^{-2} ($E M^{-2}$) las cuales fueron significativas ($P \leq 0.05$), y número de granos m^{-2} ($G M^{-2}$) no presento diferencias significativas; el coeficiente de variación más bajo se obtuvo en días a madurez fisiológica, días a antesis y altura de planta (Cuadro 2). En el caso de épocas el análisis estadístico detectó diferencias altamente significativas en la mayoría de las variables, a excepción de biomasa, número de espigas m^{-2} , granos m^{-2} y granos espiga $^{-1}$ las cuales fueron significativas (Cuadro 2). Y para especies la biomasa aérea final obtuvo diferencias significativas; número de grano m^{-2} y granos espiga $^{-1}$ no presentó diferencias significativas; las demás variables mostraron diferencias altamente significativas (Cuadro2).

Cuadro 2. Grados libertad y significancia de los cuadrados medios para los factores de variación del diseño experimental, para el rendimiento de grano y sus componentes, etapas fenológicas, y altura de planta, determinadas en el experimento en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.

Factor de variación	Bloques	Genotipos	Épocas	Especies	Error	CV (%)
G.L	3	24	7	3	99	
RG	148n.s.	2487**	1347**	9116**	225	25
BM	1700n.s.	13098*	16971*	26031*	7355	18
IC	0.0013*	0.0095**	0.0078**	0.0255**	0.0004	17
$E M^{-2}$	1635n.s.	4136*	3821*	13208**	2124	24
$G M^{-2}$	2131410n.s.	2906624n.s.	4710462*	4204071n.s.	1846174	29
$G E^{-1}$	51n.s.	168**	83*	118n.s.	28	20
P100G	0.09n.s.	1.11**	1.62**	5.09**	0.06	14
PH	173**	189**	337**	674**	19	10
DA	14n.s.	517**	743**	1737**	10	4
DMF	70*	164**	291**	612**	19	3
AP	115**	560**	1363**	774**	14	5

G.L.= grados libertad; RG= rendimiento de grano ($g m^{-2}$); BM= Biomasa ($g m^{-2}$); IC= Índice de cosecha; $E M^{-2}$ = número de espigas m^{-2} ; $G M^{-2}$ = número de granos m^{-2} ; $G E^{-1}$ = número de granos por espiga; P100G= peso de 100 granos; PH= peso hectolítrico ($g mL^{-1}$); DA= días a antesis (días); DMF= días a madurez fisiológica (días); AP= altura de planta (cm). n.s.=No significativo; *($P \leq 0.05$); **($P \leq 0.01$).

El análisis de varianza para la densidad de raíces en diferentes profundidades hubo diferencias altamente significativas entre genotipos, épocas y especies en las profundidades de 20-40, 40-60 y 60-80 cm; no se observaron diferencias entre genotipos en densidad de raíces en la profundidad de 0-20 cm (Cuadro 3). El coeficiente de variación más bajo se observó para la densidad de raíces en el profundidad de 60-80 cm (Cuadro 3).

Cuadro 3. Grados libertad y significancia de los cuadrados medios para los factores de variación del diseño experimental, para densidad de raíces en las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, determinadas en el experimento en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Factor de variación	G.L.	Densidad de raíces (cm cm ⁻³)				
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Bloques	3	0.24n.s.	0.009n.s.	0.003n.s.	0.001*	0.014n.s
Genotipos	7	0.07n.s.	0.06**	0.03**	0.025**	0.007n.s
Épocas	2	0.13n.s	0.19**	0.09**	0.08**	.
Especies	3	0.08n.s	0.14**	0.07**	0.06**	0.007n.s
Error	21	0.1	0.007	0.002	0.0003	0.0038
CV (%)		57.0	46.8	43.5	30.5	53.8

G.L.=Grados libertad. n.s.=No significativo; *(P≤0.05); **(P≤0.01)

4.3 Comparación entre especies

4.3.1 Rendimiento y sus componentes

La cebada produjo 13, 6, 5, 2 y 29 % mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, número de granos m⁻² y número de granos espiga⁻¹ que trigo ‘Venturero’, testigo regional; 47, 47, 10 y 32 % mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de granos

espiga⁻¹ y peso de 100 granos que triticale, y 48, 12, 42, 7, 13, 16 y 36 % mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, número de espigas m⁻², número de granos m⁻², número de granos espigas⁻¹ y peso de 100 granos que trigo (Cuadro 4). La cebada produjo mayor rendimiento de grano en menor número días a antesis y madurez fisiológica que el criollo ‘Venturero’, triticale y trigo, y tuvo menor peso hectolítrico del grano y altura de planta que el ‘Venturero’, triticale y trigo (Cuadro 4). El triticale produjo 7, 27, 15 y 19 % mayor biomasa aérea, número de espigas m⁻², número de granos m⁻² y peso hectolítrico que cebada; 13, 9, 17 y 21 % mayor biomasa aérea, número de espigas m⁻², número de granos m⁻² y número de granos espiga⁻¹ que el ‘Venturero’; y 19, 32, 27 y 8 % mayor biomasa aérea, número de espigas m⁻², número de granos m⁻², número de granos espiga⁻¹ y peso hectolítrico que trigo (Cuadro 4). El trigo tuvo 15 % mayor número de espigas m⁻² que el criollo ‘Venturero’ y 11 % mayor peso hectolítrico que cebada (Cuadro 4). El criollo ‘Venturero’ obtuvo 19, 17 y 40 % mayor número de espigas m⁻², peso de 100 grano y peso hectolítrico que cebada; 39, 44, 43, y 26 % mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, peso de 100 granos y peso hectolítrico que triticale; 40, 7, 39, 25, 12, 47 y 32 % mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, número de espigas m⁻², número de granos espigas⁻¹, peso de 100 granos y peso hectolítrico que trigo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m⁻² (E M⁻²), granos m⁻² (G M⁻²), granos por espiga (G E⁻¹), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las especies de cebada, criollo ‘Venturero’, triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Especie	RG (g m ⁻²)	BM (g m ⁻²)	IC	E M ⁻²	G M ⁻²	G E ⁻¹	P100G (g)	PH (g mL ⁻¹)	DA	DMF	AP (cm)
Cebada	101	526	0.19	195	5269	31	2.5	39	64	126	67
Criollo	88	495	0.18	241	5172	22	3.0	65	105	150	89
Triticale	54	567	0.10	266	6226	28	1.7	48	70	135	75
Trigo	53	461	0.11	181	4579	26	1.6	44	75	131	80
DMS											
(P≤0.05)	10	97	0.05	52	1666	9	0.5	7	10	7	12

4.3.2 Densidad de raíces

La densidad de raíces (DR) en promedio de los diferentes genotipos dentro de especies, el trigo ‘Venturero’ presentó 68, 74, 88 y 85 % mayor densidad de raíces que cebada en la profundidades 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm; 72, 74, 88 y 100 % mayor densidad de raíces que triticale en las profundidades de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm (Cuadro 5); y 79, 87, 88 y 100 % mayor densidad de raíces que trigo. En la profundidad de 0-20 cm no se observaron diferencias significativas, entre especies, y en la profundidad de 20-40 cm no se observaron diferencias significativas entre cebada y trigo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm), para las especies de cebada, criollo ‘Venturero’, triticale y trigo en condiciones de secano, 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Especie	Densidad de raíces (cm cm ⁻³)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Cebada	0.63	0.15	0.08	0.03	0.02
Criollo ‘Venturero’	0.73	0.47	0.31	0.25	0.13
Triticale	0.42	0.10	0.04	0.03	0.00
Trigo	0.53	0.13	0.08	0.03	0.00
DMS (P≤0.05)	0.40	0.10	0.04	0.02	0.01

La mayor proporción de raíces se concentró cerca de la superficie del suelo; cebada, el trigo ‘Venturero’, triticale y trigo produjeron 69, 39, 71 y 69 % de su densidad radical en la profundidad de 0-20 cm (Figura 3). La densidad de raíces disminuyó conforme a la profundidad del suelo en todos los genotipos, pero el ‘Venturero’ mantuvo mayor densidad de raíces que cebada, triticale y trigo entre 40 y 80 cm de profundidad; a 100 cm de profundidad no hubo diferencias en densidad de raíces entre especies (Figura 3).

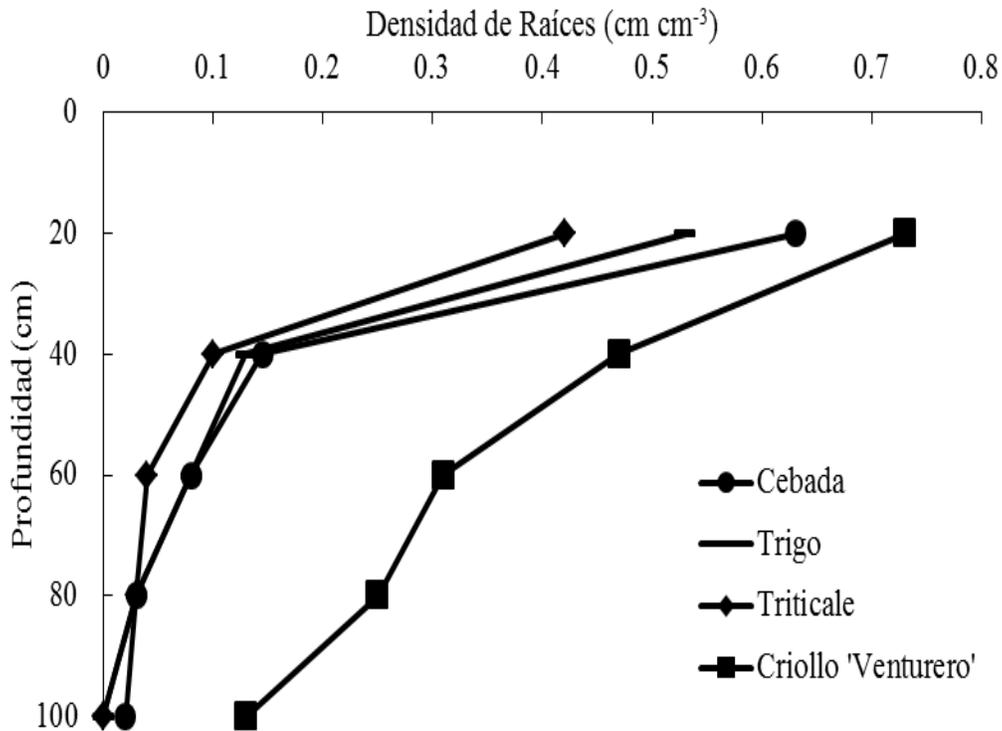


Figura 3. Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para las especies de cebada, criollo 'Venturero', triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.

4.4 Comparación entre épocas de variedades de trigo

4.4.1 Rendimiento y sus componentes

Al comparar el comportamiento de los diferentes grupos de variedades de trigo, se observó que el criollo 'Venturero' por si solo tuvo mayor rendimiento de grano y sus componentes que las demás variedades; el trigo 'Venturero' produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de espigas m⁻², peso de 100 granos, peso hectolítrico, días a antesis y días a madurez fisiológica que los demás grupos de trigos; los criollos antiguos y los genotipos de las décadas de los 60 produjeron 6 y 1 % mayor biomasa aérea final que el criollo 'Venturero'; los genotipos de las décadas de los 60 y 90 y los trigos modernos tuvieron 6, 5 y 0.7 % mayor número de granos

m⁻² que el testigo regional; los trigos de las décadas de los 60, 70, 80, 90, los trigos modernos y los trigos de líneas avanzadas tuvieron mayor número de granos espiga⁻¹ que el ‘Venturero’; los criollos antiguos y la líneas avanzadas presentaron mayor altura de planta que el testigo (Cuadro 6). El rendimiento de grano ha incrementado un 5 % para los trigos liberados, pero para las variedades no liberadas solo aumentó un 2 %.

Cuadro 6. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m⁻² (E M²), granos m⁻² (G M²), granos por espiga (G E⁻¹), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las épocas de variedades de trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	RG (g m ⁻²)	BM (g m ⁻²)	IC	E M ²	G M ²	G E ⁻¹	P100G (g)	PH (g mL ⁻¹)	DA	DMF	AP (cm)
Criollo	88	495	0.18	241	5172	22	3.0	65	105	150	89
‘Venturero’											
Criollos antiguos	46	523	0.09	187	4103	22	1.4	40	83	132	98
Década de los 60	47	500	0.09	197	5470	27	1.2	38	80	134	82
Década de los 70	59	435	0.13	188	4271	23	1.9	44	69	127	70
Década de los 80	55	396	0.14	155	3616	25	1.7	46	69	127	74
Década de los 90	43	487	0.09	189	5420	29	1.6	45	78	134	68
Modernos	65	445	0.14	185	5208	29	1.7	48	73	130	75
Líneas avanzadas	49	444	0.11	161	4009	25	1.5	43	73	133	92
Media General	54	464	0.12	184	4748	26	1.7	45	76	132	81
DMS (P≤0.05)	19	82	0.04	39	1261	5	0.3	6	8	5	5

4.4.2 Densidad de raíces

La extracción de raíces se realizó sólo en un subgrupo de genotipos de trigos antiguos y modernos, y el trigo ‘Venturero’; se determinó que el criollo ‘Venturero’ fue el genotipo que produjo mayor densidad de raíces que los trigos antiguos en todas las profundidades de suelo

muestreadas, excepto, en la profundidad de 0-20 cm, donde la densidad de raíces del trigo ‘Venturero’ y la densidad radical de los trigos antiguos fue la misma (Cuadro 7). Se observó también que el trigo ‘Venturero’ fue el único que produjo raíces hasta 1 m de profundidad (Cuadro 7).

Los trigos antiguos y modernos concentraron más del 60 % de la densidad de raíces en los primeros 20 cm de profundidad (Figura 4). El criollo ‘Venturero’ a diferencia de los trigos antiguos y modernos, presentó una distribución más uniforme de las raíces en el perfil del suelo; el criollo ‘Venturero’ acumuló el 39 % de la materia de seca de su sistema radical en la profundidad de 0-20 cm y 25, 16, 13, 7 % en las profundidades de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, respetivamente (Cuadro 7 y Figura 4).

Cuadro 7. Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) para un subgrupo de genotipos de trigos antiguos, modernos y el trigo ‘Venturero’ en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Densidad de raíces (cm cm⁻³)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Criollo ‘Venturero’	0.73	0.47	0.31	0.25	0.13
Criollos antiguos	0.62	0.15	0.10	0.05	0.00
Modernos	0.44	0.11	0.06	0.02	0.00
DMS (P≤0.05)	0.42	0.11	0.06	0.03	0.01

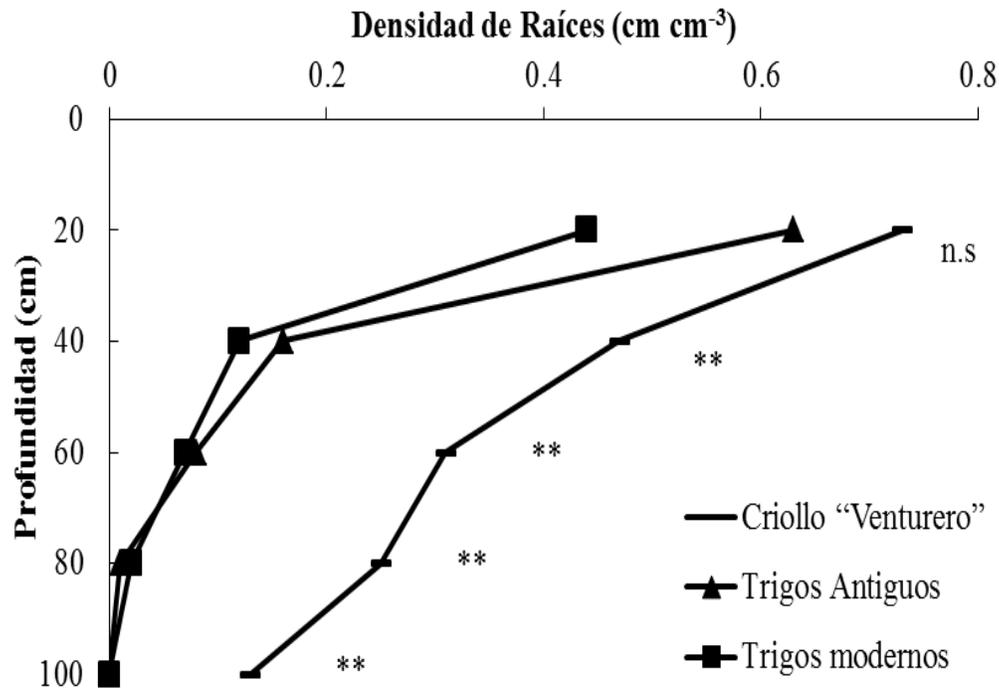


Figura 4. Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para un subgrupo de genotipos de trigos antiguos, modernos y el criollo ‘Venturero’ en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.

4.5 Comparación entre genotipos

4.5.1 Rendimiento y sus componentes

La variabilidad genética en rendimiento y sus componentes entre genotipos en forma individual fue substancial; las variedades de cebada Cleopatra y Lenetah produjeron 53 y 6 %, y 44 y 5 % mayor rendimiento de grano e índice de cosecha que el ‘Venturero’ (Cuadro 8); las cebadas Cleopatra, Betzes, el triticale 118, los genotipos antiguos Yaqui 50 y Marroqui y el trigo de la década de los 60 Nainari 60 obtuvieron mayor biomasa aérea final que el criollo; la cebada Betzes y el triticale 118 tuvieron 5 y 10 % mayor número de espigas m⁻², respectivamente.

Cuadro 8. Rendimiento de grano (RG), biomasa aérea final (BM), índice de cosecha (IC), espigas m⁻² (E M⁻²), granos m⁻² (G M⁻²), granos por espiga (G E⁻¹), peso de 100 granos (P100G), peso hectolítrico (PH), días a antesis (DA), días a madurez fisiológica (DMF) y altura de planta (AP), para las variedades de cebada, triticale, criollo ‘Venturero’ y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo Otoño-invierno 2013-2014.

Genotipos	RG (g m ⁻²)	BM (g m ⁻²)	IC	E M ⁻²	G M ⁻²	G E ⁻¹	P100G (g)	PH (g mL ⁻¹)	DA	DMF	AP (cm)
Cebada											
Cleopatra (6H)	135	512	0.26	125	6319	51	3.1	40.1	67	116	74
Lenetah (2H)	93	492	0.19	208	4630	23	2.5	39.4	64	126	60
Betzes (2H)	76	573	0.13	252	4857	19	2.0	38.6	60	135	67
Media	101	526	0.19	195	5269	31	2.5	39.8	64	126	67
Triticale											
Triticale 118 (Primavera)	54	567	0.10	266	6226	28	1.7	47.9	70	135	75
Trigo											
Criollo ‘Venturero’	88	495	0.18	241	5172	22	3.0	64.6	105	150	89
Criollos antiguos											
Yaqui 50	70	546	0.13	191	4641	24	1.9	46.5	67	129	97
Marroqui	42	587	0.07	186	3854	21	1.3	37.9	90	135	107
Gabo	26	437	0.06	183	3815	21	1.1	36.8	91	132	91
Media	46	523	0.09	187	4103	22	1.4	40.3	83	132	98
Década de los 60											
Nainari 60	58	497	0.11	192	5910	29	1.3	37.9	71	135	85
Huamantla	39	504	0.08	202	5030	25	1.0	38.9	88	132	78
Media	49	500	0.09	197	5470	27	1.2	38.3	80	134	82
Década de los 70											
Salamanca S-75	68	480	0.14	183	4797	26	2.0	38.7	67	129	71
Cleopatra VS-74	65	396	0.16	178	3980	22	2.3	50.7	67	126	65
Pavón F-76	44	420	0.11	201	4037	20	1.5	43.2	74	125	73
Media	59	435	0.15	188	4271	23	1.9	44.2	69	127	70
Década de los 80											
Gálvez M-87	72	421	0.17	133	3924	31	1.9	51.5	67	125	74
Temporalera M-87	39	371	0.10	172	3308	19	1.5	40.3	72	129	74
Media	55	396	0.14	155	3616	25	1.7	45.9	69	127	74
Década de los 90											
Verano S-91	60	464	0.13	187	5189	28	1.7	47.9	67	129	73
Romoga F-96	57	509	0.11	220	5706	26	1.7	43.7	72	132	73
Borlaug M-95	13	489	0.03	159	5366	34	1.4	43.5	95	142	60
Media	43	487	0.09	189	5420	29	1.6	45.0	78	134	68
Modernos											
Blanca grande	84	462	0.18	187	5807	31	1.9	55.0	67	126	74
Tlaxcala F-2000	70	386	0.17	169	4166	25	2.0	50.3	67	128	71
Rebeca F-2000	55	461	0.11	192	4875	29	1.5	40.9	86	131	76
Náhuatl F-2000	49	457	0.11	194	5984	33	1.3	43.9	71	135	82
Media	64	441	0.14	185	5208	29	1.7	47.5	73	130	75
Líneas avanzadas											
VEE/5/SKH8/4/RRV/WW15/3/BJ//ON*3/BON ICW86 1034-300L-300AP-0L-5AP-0L-0AP (F ₆ , ICARDA, Siria)	73	487	0.15	159	4754	30	1.7	50.1	67	134	92
Temp. M-87/Col. 1718 CPRST-13-12T (F ₄)	43	462	0.09	169	4100	25	1.5	43.1	72	132	92
Temp. M-87/Col.1718 CPRST-13-13T (F ₄)	30	384	0.08	156	3173	21	1.3	34.3	81	132	93
Media	49	444	0.11	161	4009	25	1.5	43	73	133	92
Media General	60	476	0.13	189	4748	26	1.8	44	75	131	79
DMS (P≤0.05)	22	123	0.03	66	2031	8	0.3	6.	5	6	5
CV	25	18	17	24	29	20	14	10	4	3	5

Dos de las variedades de cebada, triticale 118 y diez trigos produjeron mayor número de granos espiga⁻¹ que el testigo regional (Cuadro 8); la cebada Cleopatra obtuvo 3 % mayor peso de 100 granos que el criollo; el criollo ‘Venturero’ obtuvo el mayor peso hectolítrico, días a antesis y madurez fisiológica que los demás genotipos; siete variedades de trigo tuvieron mayor altura de planta que el criollo ‘Venturero’ (Cuadro 8).

4.5.2 Densidad de raíces

La densidad de raíces se determinó en un subgrupo de líneas de cebada, trigo y triticale; se observó que el criollo ‘Venturero’ produjo 75, 64, 79, 64, 70, 85 y 66 %; 74, 74, 87, 65, 71, 84 y 74 %; 92, 84, 88, 84, 76, 96 y 88 %; 100, 69, 100, 100, 100 y 100 % mayor densidad de raíces que Cleopatra, Lenetah, Triticale 118, Yaqui 50, Marroqui, Tlaxcala F-2000 y Náhuatl F-2000, en las profundidades de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, respectivamente (Cuadro 9). En la profundidad de 0-20 cm no se observaron diferencias significativas entre los genotipos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Densidad de raíces de acuerdo a la profundidad del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) para las variedades de cebada, triticale, criollo ‘Venturero’ y trigo en condiciones de secano, ciclo Otoño-invierno, 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.

Genotipos	Densidad de raíces (cm cm ⁻³)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Cebada					
Cleopatra (Cebada 6H)	0.62	0.12	0.08	0.02	0.00
Lenetah (Cebada 2H)	0.64	0.17	0.08	0.04	0.04
Media	0.63	0.15	0.08	0.03	0.02
Triticale					
Triticale 118 (Primavera)	0.42	0.10	0.04	0.03	0.00
Trigo					
Criollo ‘Venturero’	0.73	0.47	0.31	0.25	0.13
Criollos antiguos					
Yaqui 50	0.67	0.17	0.11	0.04	0.00
Marroqui	0.58	0.14	0.09	0.06	0.00
Media	0.63	0.16	0.10	0.05	0.00
Modernos					
Tlaxcala F-2000	0.32	0.07	0.05	0.01	0.00
Náhuatl F-2000	0.56	0.16	0.08	0.03	0.00
Media	0.44	0.12	0.07	0.02	0.00
Media General	0.57	0.18	0.10	0.06	0.11
DMS (P≤0.05)	0.50	0.12	0.07	0.03	0.01

Al comparar en forma individual las líneas utilizadas para determinar la densidad de raíces se observó que el criollo ‘Venturero’ tuvo una mayor densidad radical que los demás genotipos en las profundidades de 20-40, 40-60 y 80-100 cm (Figura 5). En la profundidad de 60-80 cm también se observaron diferencias significativas en la densidad de raíces entre genotipos;

Lenetah, Triticale 118, Yaqui 50, Marroqui, y Náhuatl F-2000 tuvieron mayor densidad de raíces que Cleopatra y Tlaxcala F-2000; no se observaron diferencias significativas entre genotipos en la profundidad de 0-20 cm (Figura 5).

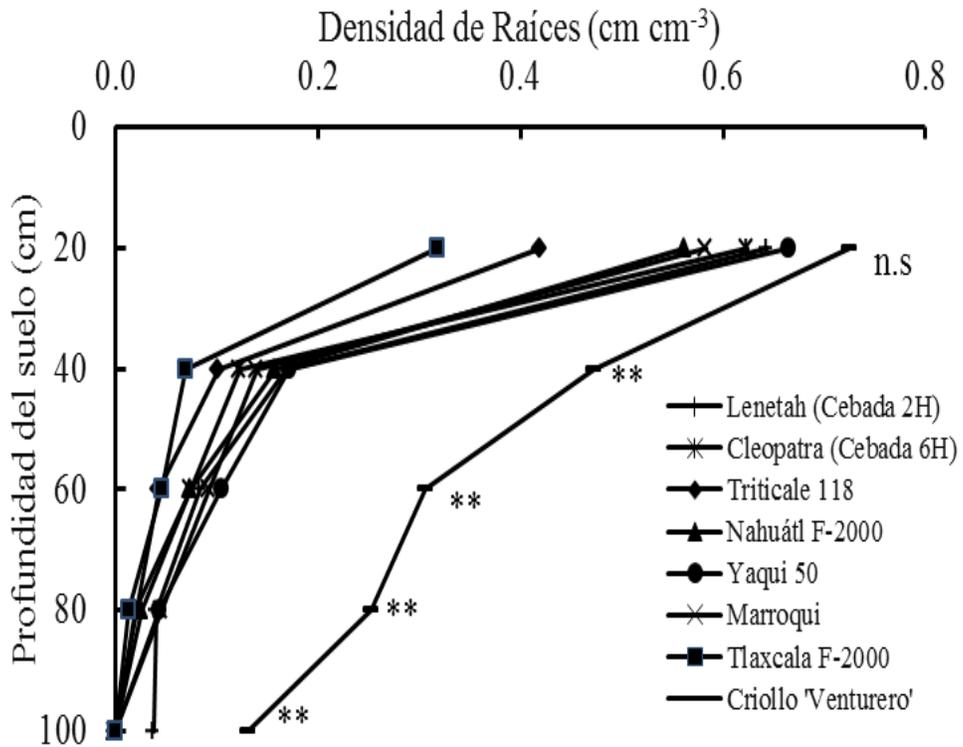


Figura 5. Densidad de raíces determinada en diferentes profundidades del suelo, para las variedades de cebada, triticale y trigo en condiciones de secano, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.

5. DISCUSIÓN

5.1 Variación en temperatura del aire, lluvia y contenido hídrico del suelo

Las temperaturas mínimas y máximas promedio registradas durante el ciclo fueron 7 y 24 °C; valores de temperatura favorables para el crecimiento y desarrollo del trigo y la cebada; la temperatura base de crecimiento, temperatura óptima y temperatura máxima, que representan los límites inferior, óptimo y superior, para el crecimiento de los cereales menores es 0 °C (Cao y Moss, 1989; López-Castañeda *et al.*, 1996) o 3-4 °C (Arnon, 1972); 25 °C y 30-32 °C (Arnon, 1972), a la que el crecimiento de las plantas empieza a disminuir rápidamente (Vincent, 1989).

La disponibilidad de humedad en suelo fue muy restringida al presentarse la mayor proporción de lluvia en las tres primeras semanas después de la siembra; posteriormente la lluvia se distribuyó en forma irregular, causando severos síntomas de estrés hídrico en la plantas alrededor de la antesis y durante el periodo de llenado del grano, debido a la presencia de sequía terminal hacia el final del ciclo biológico de las plantas; las deficiencias hídricas limitan el crecimiento en mayor grado que la fotosíntesis, pues relativamente más carbohidratos están disponibles para otros propósitos en la planta, que para el crecimiento bajo condiciones de deficiencias hídricas (Black, 1968). Las deficiencias hídricas en ésta etapa reducen considerablemente el contenido hídrico en las células de la planta, mostrando síntomas de marchitamiento y pérdida de turgencia, que repercuten en una disminución del intercambio gaseoso y fotosíntesis de la planta y finalmente, el rendimiento de grano (Blum, 2011).

5.2 Comparación entre especies

5.2.1 Rendimiento y sus componentes

La cebada produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha y número de granos por espiga que el criollo ‘Venturero’, triticale y trigo; la cebada fue menos afectada por la sequía en el rendimiento de grano y sus componentes que el ‘Venturero’, triticale y trigo, debido a que completó sus procesos de desarrollo fenológico en menor tiempo, al escapar al severo estrés hídrico terminal durante el periodo de llenado del grano; otros estudios en condiciones de secano con sequía terminal han determinado que la cebada supera en rendimiento de grano a trigo y triticale, debido a su rápido desarrollo del área foliar y acumulación de materia seca en menor tiempo; mayor eficiencia en el uso del agua para producir materia seca y rendimiento, y mayor índice de cosecha que éstos cereales (Siddique *et al.*, 1990; López-Castañeda y Richards, 1994a; López-Castañeda y Richards, 1994b; López-Castañeda y Richards, 1994c).

Otros estudios realizados en líneas experimentales de porte alto, intermedio y bajo de avena, cebada de primavera e invierno, trigo de invierno y centeno de invierno en condiciones de secano, mostraron que las cebadas de invierno y primavera tuvieron mayor rendimiento de grano que los trigos y centenos invernales, y avena, y que estos mayores rendimientos de grano, se debieron a un mayor índice de cosecha (Singh y Stoskopf, 1971); adicionalmente, se observó que la altura de planta estuvo negativamente relacionada con el índice de cosecha y que una reducción en la altura de planta, la cual reduce el tamaño de la demanda del tallo, pudo haber reducido la capacidad de almacenamiento de asimilados en el tallo; una correlación negativa y significativa entre la altura de planta y el índice de cosecha en trigos de invierno, sugiere que el índice de cosecha puede mejorarse, reduciendo el tamaño de la planta (Singh y Stoskopf, 1971); el incremento en el índice de cosecha observado en las líneas de porte bajo seleccionadas con

respecto a los testigos locales y los trigos de porte alto e intermedio fue similar a lo observado por Vogel *et al.* (1963), en el este de Washington.

El índice de cosecha fue el componente que más contribuyó al alto rendimiento de grano de cebada, posiblemente debido a una mejor distribución de los asimilados entre los órganos vegetativos y el grano (Singh y Stoskopf, 1971). Además, estos autores señalan que un mayor índice de cosecha y rendimiento de grano bajo sequía, se pueden lograr al seleccionar plantas de menor porte, entrenudos más cortos o menor número de entrenudos y un periodo vegetativo más corto; con base a los resultados obtenidos, se observa que la cebada reúne algunos de éstos caracteres, lo que puede explicar su mejor comportamiento que trigo y triticale en condiciones de sequía terminal. Otros caracteres de la planta que pueden contribuir a un mayor índice de cosecha y rendimiento de grano bajo condiciones de estrés terminal en cereales de grano pequeño, son mayor tasa de llenado de grano y mayor removilización de reservas del tallo al grano durante el periodo de llenado del grano; en cebada la removilización de asimilados del tallo al grano tuvo una contribución al rendimiento de grano de 70 % y 57 % en trigo harinero, en dos localidades con sequía terminal en el sureste de Australia (López-Castañeda y Richards, 2001).

Los trigos duros y cebada son considerados más tolerantes a la sequía o con rendimientos más altos que el trigo harinero en ambientes de estrés hídrico (Cooper, *et al.*, 1987; Fischer, 1989; Josephides, 1993; López-Castañeda, 1994a); el triticale está adaptado a ambientes marginales (Lukaszewski y Gustafson, 1987), y avena y cebada han sido seleccionados por tener alta producción de biomasa para heno y pastoreo, y grano (López-Castañeda, 1994a).

5.2.2 Densidad de raíces

La mayor proporción de raíces se concentra en los primeros 15 cm de profundidad y disminuye a mayor profundidad (Atta *et al.*, 2013); en el presente estudio, cebada produjo mayor densidad de raíces (69 %) el criollo ‘Venturero’ (39 %), y una densidad radical similar a trigo (69 %) y triticale (71 %) en la profundidad más cercana a la superficie del suelo (20 cm), y en las profundidades entre 20-100 cm, el trigo ‘Venturero’ produjo mayor densidad de raíces que cebada, triticale y trigo; otro estudio en condiciones de secano con estrés hídrico terminal en dos localidades de Australia, se determinó que cebada produjo mayor densidad radical (51 %) que trigo (44 %) y triticale (46 %) en los primeros 15 cm de profundidad del suelo y mantuvo estas diferencias hasta 1 m de profundidad, y posteriormente presentaron una densidad de raíces similar hasta 1.4 m de profundidad (López-Castañeda y Richards, 1994a).

Las diferencias en densidad de raíces entre los datos obtenidos en el presente estudio y los obtenidos en Australia, pueden deberse a un mayor grado de estrés hídrico terminal experimentado por las plantas en el presente estudio que el trabajo de investigación realizado en Australia. Gregory *et al.* (1992) también, observaron que la cebada produjo mayor densidad radical que trigo entre 0 y 75 cm de profundidad en condiciones de secano con sequía terminal en Australia Occidental.

5.3 Comparación entre épocas de variedades de trigo

5.3.1 Rendimiento y sus componentes

El criollo ‘Venturero’ o testigo regional produjo mayor rendimiento de grano que los demás genotipos de trigo; este alto rendimiento de grano se debió a un mayor índice de cosecha, número de espigas m⁻², peso de 100 granos y peso hectolítrico que las demás variedades de trigo;

el trigo ‘Venturero’ produjo su mayor rendimiento de grano con mayor número de días a antesis y madurez fisiológica que los otros genotipos de trigo.

Además, los criollos antiguos y los de las décadas de los 60’ produjeron mayor biomasa aérea final que el criollo ‘Venturero’; los genotipos de las décadas de los 60’s y 90’s, y los trigos modernos obtuvieron mayor número de granos m^{-2} que el testigo regional; la mayoría de los trigos, excepto los criollos antiguos tuvieron mayor número de granos espiga⁻¹ que el ‘Venturero’; los criollos antiguos y las líneas avanzadas presentaron mayor altura de planta que el ‘Venturero’.

En otros estudios en trigo, se determinó que las líneas F₅ de alto rendimiento de grano derivadas de la población Seri-Babax-Seri, bajo condiciones de sequía en Tlatizapan, Morelos, produjeron mayor rendimiento de grano, debido a una mayor biomasa aérea final, índice de cosecha, espigas m^{-2} y peso de doscientos granos que las líneas F₅ de bajo rendimiento de grano (López-Castañeda, 2013). Siddique *et al.* (1989a) observaron que las variedades modernas de trigo produjeron mayor rendimiento de grano y tuvieron mayor índice de cosecha que las variedades antiguas, en condiciones de sequía terminal en Shenton Park, Perth, Australia Occidental; estos autores también observaron que las líneas isogénicas semi-enanas (*Rht*), tuvieron mayor índice de cosecha que las variedades antiguas de porte alto y que las variedades modernas han incrementado su rendimiento, debido a un aumento en el número de granos y una reducción en la competencia por asimilados entre la espiga y el tallo.

Los trigos modernos alcanzaron la iniciación floral, espiguilla terminal, antesis y madurez fisiológica en menor número de días que los cultivares antiguos en condiciones de sequía terminal en Merredin, Australia Occidental y con ésta rapidez para alcanzar las diferentes etapas fenológicas, estuvieron menos expuestos a la sequía terminal que los trigos antiguos; también se

observó que los trigos modernos produjeron menor número de hojas en el tallo principal y éstas aparecieron más rápidamente, resultando en menor índice de área foliar verde que los trigos antiguos, sin embargo, los trigos modernos tuvieron mayor eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa para la producción de materia seca (Siddique *et al.*, 1989b).

5.3.2 Densidad de raíces

Los trigos modernos y antiguos concentran la mayor proporción de raíces en los primeros 20 cm, mientras que el trigo ‘Venturero’ tiene mejor distribución en el perfil de suelo, hasta los 100 cm de profundidad. El trigo ‘Venturero’ tuvo mayor densidad de raíces a partir de 20 a 100 cm de profundidad que los trigos antiguos y de 40 a 100 cm mayor que los trigos modernos. Siddique *et al.* (1990), observaron en condiciones de campo con sequía terminal en Merredin, Australia Occidental, que las variedades modernas asignaron menor cantidad de materia seca a las raíces que los cultivares antiguos; estos autores también observaron que las variedades antiguas produjeron mayor cantidad de materia seca y densidad de raíces en la profundidad de 0-40 cm, donde se concentró la mayoría de las raíces.

Waines y Ehdaie (2007), al comparar la acumulación de materia seca en raíces de trigos antiguos y modernos, producto de la ‘revolución verde’, observaron que los trigos antiguos produjeron mayor cantidad de materia seca en las raíces que los trigos modernos; también determinaron que las aislíneas de Pavon 76 que poseen la translocación del brazo corto del cromosoma 1 de centeno (1RS), aumentaron la biomasa y la ramificación de las raíces en los cultivares que la contienen tanto en condiciones de riego como en condiciones de sequía.

Otros estudios en raíces de trigo, mostraron que la sequía redujo la biomasa de raíces, la biomasa de la parte aérea y el rendimiento de grano en macetas en condiciones de invernadero en

Riverside, CA; la reducción en el peso seco de la parte aérea fue mayor que la reducción en el peso seco de raíces, indicando que bajo condiciones de estrés por sequía, relativamente más asimilados se transportan a las raíces para el desarrollo de un sistema radical más vigoroso requerido para la absorción de agua y nutrientes (Ehdaie *et al.*, 2012).

5.4 Comparación entre genotipos

5.4.1 Rendimiento y sus componentes

Las variedades Cleopatra y Lenetah de cebada produjeron mayor rendimiento de grano que el ‘Venturero’, y este alto rendimiento de grano se debió a un mayor índice de cosecha. Además, las variedades de cebada Cleopatra y Betzes, el triticale 118, los trigos Yaqui 50, Marroqui y Nainari 60; la variedad de cebada Betzes y el triticale 118; las variedades de cebada Cleopatra y Lenetah, el triticale 118 y diez trigos de diferentes épocas; la cebada Cleopatra; y siete variedades de trigo, obtuvieron mayor biomasa aérea final, número de espigas m^{-2} , número de granos espiga⁻¹, peso de 100 granos y mayor altura de planta que el ‘Venturero’; el testigo regional o ‘Venturero’ obtuvo mayor peso hectolítrico, número de días a antesis y madurez fisiológica que todos los demás genotipos. Resultados similares obtuvieron López-Castañeda y Richards (1994a) bajo condiciones de sequía terminal en Moombooldool y Condobolin, New South Wales, Australia, donde observaron que la cebada O’Connor, produjo 39 % mayor rendimiento de grano que el trigo Kulin, esto debido a que la cebada produjo 27 % mayor materia seca aérea final que el trigo variedad Kulin. La variación en rendimiento de grano, biomasa aérea y número de granos m^{-2} en cebada bajo condiciones de riego y sequía en Montecillo, Texcoco, Estado de México y en temporal en San Lorenzo, Cuapiaxtla, Tlaxcala fue muy amplia; se determinó que las líneas F₆ produjeron mayor rendimiento de grano, biomasa

aérea y número de granos m^{-2} que las variedades comerciales en promedio de los tres ambientes y también que el rendimiento de grano, la biomasa aérea y el número de granos m^{-2} , estuvieron relacionados positiva y significativamente entre sí, indicando que las líneas con mayor rendimiento de grano tuvieron mayor biomasa aérea y número de granos m^{-2} (López-Castañeda, 2011).

5.4.2 Densidad de raíces

La mayor proporción de raíces se concentró cerca de la superficie del suelo (20 cm de profundidad) en todos los genotipos de cebada, criollo, triticale y trigo; fue interesante observar que el trigo ‘Venturero’ produjo más raíces que los genotipos de cebada, triticale y las demás variedades de trigo en las profundidades de 20-100 cm y que las variedades de cebada, Lenetah; triticale, Triticale 118; y trigo, Yaqui 50, Marroqui, y Náhuatl F-2000 tuvieron mayor densidad de raíces que la variedad de cebada Cleopatra y el trigo Tlaxcala F-2000, en la profundidad de 60 a 80 cm.

En otros estudios de raíces en cebada y trigo, se observó que la mayor proporción de raíces se concentró cerca de la superficie del suelo (15 cm) en ambas especies; también se determinó que la variedad de trigo Gutha tuvo un sistema radical confinado a una profundidad arriba de los 60 cm, mientras que las raíces de todas las variedades de cebada penetraron hasta 80 cm; la densidad de raíces de Beecher y O’Connor disminuyó en la superficie 0-10 cm entre los 83 y 111 dds, pero continuó creciendo abajo de los 40 cm, de tal manera que a los 111 dds, pasó de 12 a 25 %, respectivamente (Gregory *et al.*, 1992). López-Castañeda y Richards (1994a) compararon la densidad y el peso seco acumulado en las raíces de cebada, trigo y triticale en condiciones de sequía terminal en las localidades de Condobolin y Moombooldool, Nueva Gales del Sur en Australia, al observar en primer lugar que la mayor proporción de raíces se produjo cerca de la

superficie del suelo (15 cm); cebada tuvo dos veces mayor densidad y peso seco de raíces que trigo en Condobolin en 1989 y trigo y triticale en Moombooldool en 1990; la mayor diferencia entre especies ocurrió en los primeros 15 cm de profundidad, sin embargo, cebada tuvo más raíces en todas las profundidades hasta los 90 cm en Moombooldool en 1990; la densidad radical y el peso seco de raíces del triticale variedad Dua fueron idénticas a las de los cultivares de trigo en Moombooldool en 1990. Atta *et al.* (2013), al estudiar el impacto de la variación en caracteres de la raíz en la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento en trigo bajo condiciones de riego y sequía en Narrabrai, Nueva Gales del Sur en Australia, observaron que los máximos valores para los caracteres de la raíz se obtuvieron cerca de la superficie del suelo (15 cm) y estos disminuyeron con la profundidad, con la excepción del diámetro de raíz en condiciones no limitantes de humedad; la densidad radical promedio en ambos ambientes fue mayor que 0.5 cm cm^{-3} , lo cual es considerado suficiente para extraer toda la humedad del suelo; todos los caracteres de la raíz tuvieron alta heredabilidad y los genotipos sintéticos del CIMMYT fueron generalmente superiores a las variedades comerciales Australianas, en los caracteres de raíz y tuvieron mayor eficiencia en el uso del agua y rendimiento de grano.

También, se ha determinado que el tamaño del sistema radical tiene relación con el rendimiento de grano en cebada bajo condiciones de sequía en Želešice, República Checa; las variedades con mayor tamaño del sistema radical produjeron mayor rendimiento de grano bajo sequía; las variedades malteras con sistema radical más grande tuvieron mayor contenido de almidón, sacáridos, extracto de malta y rendimiento de proteína (Chloupek *et al.*, 2010).

6. CONCLUSIONES

La cebada produjo mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, número de granos m^{-2} y granos espiga $^{-1}$ que el criollo 'Venturero'; mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de granos espiga $^{-1}$ y peso de 100 granos que triticale; y mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, número de espigas m^{-2} , granos m^{-2} , granos espiga $^{-1}$ y peso de 100 granos que trigo; la cebada produjo su alto rendimiento en menor número de días a antesis y madurez fisiológica que el 'Venturero', triticale y trigo.

El triticale produjo mayor biomasa aérea, número de espigas m^{-2} , granos m^{-2} y peso hectolítrico que cebada; mayor biomasa aérea, número de espigas m^{-2} , granos m^{-2} y granos espigas $^{-1}$ que el criollo 'Venturero'; mayor biomasa aérea, número de espigas m^{-2} , granos m^{-2} , granos espiga $^{-1}$ y peso hectolítrico que trigo; el trigo tuvo mayor número de espigas m^{-2} que el criollo 'Venturero' y mayor peso hectolítrico que cebada.

El criollo 'Venturero' obtuvo mayor número de espigas m^{-2} , peso de 100 granos y peso hectolítrico que cebada; mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, peso de 100 granos y peso hectolítrico que triticale, y mayor rendimiento de grano, biomasa aérea final, índice de cosecha, número de espigas m^{-2} , granos espiga $^{-1}$, peso de 100 granos y peso hectolítrico que trigo.

La mayor proporción de raíces en cebada, 'Venturero', triticale y trigo se concentró cerca de la superficie del suelo (20 cm), sin presentar diferencias entre especies; el trigo criollo produjo mayor densidad de raíces entre los 20 y 100 cm que cebada, triticale y trigo.

La variabilidad genética entre los épocas de trigo mostró que el trigo 'Venturero' produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de espigas m^{-2} , peso de 100 granos, peso hectolítrico, número de días a antesis y madurez fisiológica que los demás genotipos; también,

produjo mayor cantidad de raíces que los demás genotipos de trigo y tuvo una mejor distribución de raíces que los demás trigos de 20 a 100 cm de profundidad.

La variabilidad genética entre todos los genotipos de cebada, trigo y triticale en conjunto mostró que la variedad de cebada Cleopatra, fue la que tuvo el más alto rendimiento de grano, índice de cosecha y granos espiga⁻¹; el mayor rendimiento de grano de la variedad Cleopatra se obtuvo con menor número de días a madurez fisiológica que los demás genotipos.

Los genotipos de cebada y trigo con mayor densidad de raíces, produjeron mayor rendimiento de grano en condiciones de sequía terminal.

7. LITERATURA CITADA

- Aguilar, M. I. and R. A. Fisher. 1975. Análisis de crecimiento y rendimiento de 30 genotipos de trigo bajo condiciones óptimas. *Agrociencia*. 21: 185-197.
- Arnon, I. 1972. Crop production in dry regions. Vol. II: Systematic treatment of the principal crops. Leonard Hill, Great Britain. 683 p.
- Atta, B. M., T. Mahmood and R. M. Trethowan. 2013. Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. *Australian Journal of Crop Science* 7: 2108-2115.
- Black, C. A. 1968. Soil-plant relationship. Editorial John Wiley, United States of America. 792 p.
- Blum, A. 2011. Plant breeding for water-limited environments. Springer. New York, USA. 267 p.
- Cao, W. and D. N. Moss. 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Science* 29: 1018-1021.
- Chloupek, O., V. Dostál, T. Sřreda, V. Psota and O. Drořáckrová. Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size. *Plant Breeding* 129: 630-636.
- Cooper, P. J. M., P. J. Gregory, J. D. H. Keatinge and H. C. Harris. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture* 23: 113-158.
- Denčić, 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: 43-52.

- Ehdaie, B., A. P. Layne and J. G. Waines. 2012. Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat. *Euphytica* 186: 219-232.
- Fábián, A., K. Jäger, M. Rakszegi and B. Barnabás. 2011. Embryo and endosperm development in wheat (*Triticum aestivum* L.) kernels subjected to drought stress. *Plant Cell Reports* 30: 551-563.
- Feyerherm, A. M., G. M. Paulsen and J. L. Sebaugh. 1984. Contribution of genetic improvement to recent wheat yield increases in the USA. *Agronomy Journal* 76: 985-990.
- Fischer, R. A. 1989. Cropping systems for greater drought resistance. *In*: F.W. Baker (Ed.). *Drought resistance in cereals*. C. A. B. International, UK. Pp. 201-211.
- García, E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köeppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 252 p.
- Gregory, P. J., D. Tennant and R. K. Belford. 1992. Root and shoot water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 43: 555-573.
- Gregory, P. J., J. A. Palta and G. R. Batts. 1997. Root systems and root: mass ratio-carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops. *Plant and Soil* 187: 221-228.
- Hurd, E. A. 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agricultural Meteorology* 14: 39-55.
- Josephides, C. M. 1993. Analysis of adaptation of barley, triticale, durum and bread wheat under Mediterranean conditions. *Euphytica* 65: 1-8.

- Kirby, E. J. M. and M. Appleyard. 1984. Cereal guide development. Plant Breeding Institute, Arable Unit, National Agricultural Centre, Stoneleigh, Kenilworth, Warwickshire CV82LZ, England. 95 p.
- Kramer, P. J. 1969. Plant and soil water relationships: A modern synthesis. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York, USA. 482 p
- Laing, D. R. and R. A. Fischer. 1977. Adaptation of semi dwarf wheat cultivars to rained conditions. *Euphytica* 26: 129-139.
- Lehane, J. J. and W. J. Staple. 1962. Effects of soil moisture tensions on growth of wheat. *Canadian Journal of Soil Science* 42: 180-188.
- Legaria, S. J. P y A. Muñoz O. 1992. Interacción de variedades de trigo con ambientes secos de la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Fitotecnia Mexicana* 15: 40-50.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994a. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristics. *Field Crops Research* 37: 51-62.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994b. Variation in temperate cereals in rainfed environments. II. Phasic development and growth. *Field Crops Research* 37: 63-72.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994c. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Research* 39: 85-98.
- López-Castañeda, C. 1996. Uso eficiente del agua en un agrosistema sustentable. Memorias del II simposio Internacional y III Reunión Nacional sobre Agricultura Sostenible. Campus San Luis Potosí, Colegio de Postgraduados. San Luis Potosí, México. Diciembre 1-3 pp: 329-338.

- López-Castañeda, C., R. A. Richards, G. D. Farquhar and R. E. Williamson. 1996. Seed and seedling characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Science* 36: 1257-1266.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 2001. ¿Contribuyen la tasa de crecimiento y removilización de las reservas del tallo al rendimiento de grano durante la sequía?. *In: Memorias IV Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, B.C., México. Octubre 25-26, 2001. Pp: 61-66.*
- López-Castañeda, C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14: 907-918.
- López-Castañeda, C. 2013. Resistencia a sequía en trigo. *In: Avances de Investigación 2012. Postgrado en Recursos Genéticos y Reproductividad-Genética. Cruz-Izquierdo S.; Ayala-Garay O. J.; Cruz-Huerta N.; Ramírez-Ramírez I.; Martínez-Villegas E. (eds). Colegio de Postgraduados, México. Pp. 35:39.*
- Loss, S. P., E. J. M. Kirby, K. H. M. Siddique and M. W. Perry. 1989. Grain growth and development of old and modern Australian wheats. *Field Crops Research* 21: 131-146.
- Lukaszewski, A. J. and J. P. Gustafson. 1987. Cytogenetics of triticale. *Plant Breeding Reviews* 5: 41-93.
- Nakhforoosh, A., H. Grausgruber, H.P. Kaul and G. Bodner. 2014. Wheat root diversity and root functional characterization. *Plant and Soil* 380: 211-229.
- Nicolas, M. E., R. M. Gleadow and M. J. Dalling. 1985. Effect of post-anthesis drought on cell division and starch accumulation in developing wheat grains. *Annals of Botany* 55: 433-444.

- Parry, M. A. J., J. Flexas and H. Medrano. 2005. Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology* 147: 211-226
- Passioura, J. B. 1972. The effect of root geometry on the yield of wheat growing on stored water. *Australian Journal of Agricultural Research* 23: 745-752.
- Passioura, J. B. 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management* 7: 265-280.
- Pheloung, P. C. and K. H. M. Siddique. 1991. Contribution of stem dry matter to grain yield in wheat cultivars. *Australian Journal of Plant Physiology* 18: 53-64.
- Ramos, S. A. y E. Hernández X. 1967. Análisis del medio físico en la region con clima "A" de Köeppen en el Oriente de México y su aplicación en la investigación agropecuaria. *Agrociencia* 1(2): 1-14.
- Richards, R. A. 2008. Genetic opportunities to improve cereal root systems for dryland agriculture. *Plant Production Science* 11(1): 12-16.
- SAGARPA. 2013. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (<http://www.siap.gob.mx>) (consulta de datos estadísticos para el año 2013; Mayo 26, 2015).
- Salim, M. H., G. W. Todd and A. M. Schlehuber. 1965. Root development of wheat, oats, and barley under conditions of soil moisture stress. *Agronomy Journal* 57: 603-607.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release 9.0. SAS Inst., Cary, NC.
- Siddique, K. H. M., E. J. M. Kirby and M. W. Perry. 1989a. Ear:Stem ratio in old and modern wheat varieties; Relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Research* 21: 59-78.

- Siddique, K. H. M., 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: 473-487.
- Siddique, K. H. M., D. Tennant, M. W. Perry and R. K. Belford. 1990. Water use and water efficient use of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 41: 431-447.
- Simane, B., J. M. Peacock and P. C. Struik. 1993. Differences in developmental plasticity and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Plant and Soil* 157: 155-166.
- Singh, I.D. and N. C. Stoskopf. 1971. Harvest index in cereals. *Crop Science* 63: 224-226.
- Slafer, G. A. and F. H. Andrade. 1993. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crops Research* 31: 351-367.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63: 995-1001.
- Vincent, C. D. 1989. Recent advances in modelling crop response to temperature. *Outlook on Agriculture* 18(2): 54-57
- Vogel, O. A., R. E. Allen and C. J. Peterson. 1963. Plant performance characteristics of semi-dwarf winter wheats producing most efficiently in eastern Washington. *Agronomy Journal* 55: 397-398.
- Waines, J. G. and B. Ehdaie. 2007. Domestication and crop physiology: Roots of green-revolution wheat. *Annals of Botany* 100: 991-998.

Wang, X., M. Vignjevic, F. Liu, S. Jacobsen, D. Jiang and B. Wollenweber. 2015. Drought priming at vegetative growth stages improves tolerance to drought and heat stresses occurring during grain filling in spring wheat. *Plant Growth Regulation* 75: 677-687.