



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

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

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GENÉTICA**

**COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA  
DEL SISTEMA RADICAL EN VARIEDADES  
ANTIGUAS Y MODERNAS DE TRIGO**

**REFUGIO SILLAS COVARRUBIAS**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO**

**2022**



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Comparación de la arquitectura del sistema radical en variedades antiguas y modernas de trigo** realizada por la estudiante: **Refugio Sillas Covarrubias** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA

## CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. CÁNDIDO LÓPEZ CASTAÑEDA

ASESOR

DR. VÍCTOR HEBER AGUILAR RINCÓN

ASESOR

DR. HUMBERTO VAQUERA HUERTA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, agosto de 2022

# COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA RADICAL EN VARIEDADES ANTIGUAS Y MODERNAS DE TRIGO

Refugio Sillas Covarrubias, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## RESUMEN

La arquitectura de la raíz es importante para la adquisición de agua y nutrientes del suelo, especialmente en ambientes con sequía. Se estudió la variabilidad en caracteres de raíz y parte aérea de genotipos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos de trigo en invernadero con riego (R) y sequía (S). Se incluyeron 12 variedades de trigo, dos de triticale y dos de cebada. Se empleó un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones en R y cuatro en S; la unidad experimental fue un tubo de PVC (1 m alto y 4"diámetro) con una planta. Se utilizaron semillas con un peso de 35 mg. Las semillas se pusieron a germinar en cajas Petri y cuatro días después, se trasplantaron en los tubos de PVC. Se fertilizó con 120-60-60, 31 días después del trasplante. S redujo el  $RG$  y  $E_T$  con sus componentes e incrementó el peso seco total de raíces (PSTR), el peso seco de raíces (PSR) en los estratos de 0 a 100 cm y la EUA. Además, S produjo mayor PSTR, longitud total de raíz (LTR) y cociente raíz/parte aérea (CRPA) en los trigos antiguos que en los trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos. El mayor PSR de los trigos antiguos ocurrió en los estratos de 40 cm a 1 m. Una arquitectura de raíz que favorezca mayor penetración en el subsuelo puede aumentar la absorción de agua y nutrientes, y el rendimiento en cultivos de secano con limitaciones de humedad edáfica.

**Palabras clave:** *Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L., *Triticosecale* Wittmack, biomasa total, peso seco total de raíces.

# COMPARISON OF THE ARCHITECTURE OF ROOT SYSTEMS IN OLD AND MODERN BREAD WHEAT VARIETIES

Refugio Sillas Covarrubias, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## ABSTRACT

Root architecture is important for the acquisition of water and nutrients from soil, especially in dryland environments. Variability in root architecture characters and aerial organs of the plant among old, mid-green revolution and modern genotypes of bread wheat under watering (W) and drought (D) glasshouse conditions were studied. This included 12 bread wheat, two triticale, and two barley varieties. A complete randomized block design was used with four replicates in W and in D; a PVC pipe (1 m tall and 4" diameter) with a plant was used as experimental unit. Seeds of the same weight (35 mg) were used for all genotypes. The seeds were placed in Petri dishes and four days after, seedlings were transplanted into the PVC pipes. An application of 120-60-60 fertilizer was added in the irrigation to the plants, 31 days after transplanting. This showed that D reduced GY and  $E_T$  with their components and increased total dry weight of roots (TDWR), dry weight of roots (DWR) in all soil strata from 0 to 100 cm and WUE. Additionally, old bread wheats produced greater DWR, total length of roots (TLR) and root/shoot ratio (RSR) than mid-green revolution and modern bread wheat genotypes in D. The higher RDW of old wheats was observed in the 40 cm to 1 m strata. A root architecture that facilitates greater penetration in the subsoil may increase water and nutrient uptake, and grain yield in rainfed environments with soil moisture limitations.

**Keywords:** *Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L., *Triticosecale* Wittmack, total biomass, total dry weight of roots.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos los contribuyentes que pagan sus impuestos, ya que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) han financiado mi formación de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y especialmente al PREGEP-Genética por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad estudiantil y las facilidades durante mi estancia en tan honorable institución.

Al Dr. Cándido López Castañeda por compartir su amplio conocimiento durante mi formación académica y ejecución de presente trabajo de grado, así mismo, por su dedicación, enseñanzas y paciencia. Excelente docente y empático ser humano.

Al Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón y Humberto Vaquera por su apoyo y valiosas contribuciones realizadas al presente trabajo.

A todos los profesores y técnicos académicos que contribuyeron en mi formación académica.

Al Sr. Fidel Pérez Romero por su valioso apoyo durante la fase experimental del presente trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

A mí amado hermano (Q.E.P.D) que aunque estamos en diferentes y misteriosas dimensiones del universo siento su presencia en cada acontecimiento de mi vida y especialmente en esta etapa profesional; este logro profesional hubiese sido tan especial para él como lo es para mí.

A mi pequeña gran familia por guiarme y brindarme su amor y apoyo incondicional.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
LISTAS DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO E HIPÓTESIS .....	2
2.1 Objetivo general .....	2
2.2 Hipótesis.....	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
3.1 Arquitectura del sistema de raíces.....	3
3.2 Rendimiento de grano y sus componentes .....	5
3.3 Evapotranspiración y sus componentes.....	7
3.4 Eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria .....	9
3.5 Selección para resistencia a sequía en caracteres de las raíces .....	11
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
4.1 Localización del sitio experimental.....	13
4.2 Germoplasma .....	13
4.3 Diseño experimental.....	14
4.4 Variables medidas .....	15
4.5 Temperatura .....	17
4.6 Contenido hídrico edáfico .....	18
4.7 Análisis estadístico.....	19
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	19
5.1 Temperatura y humedad del suelo .....	19
5.2 Análisis estadístico.....	20
5.3 Rendimiento de grano y sus componentes .....	21
5.4 Arquitectura del sistema radical.....	27
5.5 Evapotranspiración y sus componentes, y eficiencia transpiratoria y eficiencia en el uso de agua .....	36

5.6 Análisis de componentes principales .....	41
VI. CONCLUSIÓN.....	44
VII. LITERATURA CITADA.....	45
ANEXOS .....	50

## LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Germoplasma de trigo, triticale y cebada, utilizado en el experimento de riego y sequía en condiciones de invernadero.....	14
Cuadro 2. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta ( $E\text{ PI}^{-1}$ ), granos por planta ( $G\text{ PI}^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) en riego y sequía.....	21
Cuadro 3. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta ( $E\text{ PI}^{-1}$ ), granos por planta ( $G\text{ PI}^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) para trigo, triticale y cebada en riego y sequía.....	22
Cuadro 4. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta ( $E\text{ PI}^{-1}$ ), granos por planta ( $G\text{ PI}^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía.....	24
Cuadro 5. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta ( $E\text{ PI}^{-1}$ ), granos por planta ( $G\text{ PI}^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) para los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía.....	25
Cuadro 6. Diferencia riego–sequía en rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta ( $E\text{ PI}^{-1}$ ), granos por planta ( $G\text{ PI}^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) para los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía.....	27
Cuadro 7. Longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en los diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA) en riego y sequía.....	29
Cuadro 8. Longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para trigo, triticale y cebada en riego y sequía.....	30
Cuadro 9. Longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía.....	32

Cuadro 10. Longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en los diferentes estratos (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm) y cociente raíz/parte aérea (CRPA) para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. ....	34
Cuadro 11. Diferencia riego-sequía para longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA) para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada.....	35
Cuadro 12. Evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET) en riego y sequía.....	36
Cuadro 13. Evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para trigo, triticale y cebada en riego y sequía.....	37
Cuadro 14. Evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía.....	39
Cuadro 15. Evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía..	40
Cuadro 16. Diferencia riego - sequía en la evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. ....	41
Cuadro 1A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para el rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E Pl-1), granos planta (G Pl-1) y tamaño del grano (TG).....	50
Cuadro 2A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para la longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de	

raíces en los estratos 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm, y cociente raíces/parte aérea (CRPA).....	51
Cuadro 3A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia transpiratoria (ET) y eficiencia en uso de agua (EUA).....	52
Cuadro 4A. Evapotranspiración ( $E_T$ ) acumulada por planta durante el experimento en riego y sequía. ....	53
Cuadro 5A. Evapotranspiración ( $E_T$ ) acumulada por planta durante el experimento para trigo, triticale y cebada en riego y sequía.....	53
Cuadro 6A. Evapotranspiración ( $E_T$ ) total por planta para trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía.....	54
Cuadro 7A. Evapotranspiración ( $E_T$ ) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio riego.....	55
Cuadro 8A. Evapotranspiración ( $E_T$ ) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, cebada y triticale en promedio de sequía.....	56
Cuadro 9A. Evapotranspiración (ET) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía.....	57
Cuadro 10A. Diferencia entre riego - sequía de la evapotranspiración (ET) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada.....	58
Cuadro 11A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento en riego y sequía.. ....	58
Cuadro 12A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para genotipos de cebada, trigo y triticale en riego y sequía.. ....	59
Cuadro 13A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para los genotipos de trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía.....	60
Cuadro 14A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego.. ....	61

Cuadro 15A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de sequía.. .....	62
Cuadro 16A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía.. .....	63
Cuadro 17A. Diferencia entre riego - sequía de la transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada.. .....	64
Cuadro 18A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento en riego y sequía.. .....	65
Cuadro 19A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para genotipos de trigo, triticale y cebada en riego y sequía.. .....	65
Cuadro 20A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para los genotipos de trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía.. .....	66
Cuadro 21A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego.....	67
Cuadro 22A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de sequía.....	68
Cuadro 23A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. ....	69
Cuadro 24A. Diferencia entre riego - sequía de la evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada en promedio durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. ....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura máxima y mínima semanal durante el experimento en invernadero.....	17
Figura 2. Contenido hídrico edáfico en riego y sequía durante el experimento. ....	18
Figura 3. Peso seco de raíces en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm en promedio de las variedades de cebada, trigo y triticale bajo riego y sequía. ....	28
Figura 4. Plano biplot del rendimiento de grano (RG) versus componentes del rendimiento, arquitectura del sistema radical, evapotranspiración y sus componentes, y eficiencia en el uso del agua para 14 genotipos de trigo, dos de triticale y dos de cebada.....	43

## I. INTRODUCCIÓN

En México y amplias áreas agrícolas del planeta, la producción de trigo y otros cereales menores se realiza en condiciones de secano, donde los cultivos están severamente expuestos a estreses abióticos tales como sequía, calor, heladas, salinidad, deficiencias de nutrientes, iones tóxicos, pH, compactación del suelo, etc. En estas condiciones de cultivo las variedades comerciales de trigo producen bajos rendimientos de grano ( $2 \text{ t ha}^{-1}$ ) (SADER, 2022), debido principalmente al déficit hídrico del suelo que generalmente se presenta en la floración y/o periodo de llenado del grano. Las deficiencias de humedad edáfica en la floración reducen la fecundación de los óvulos y consecuentemente el número de granos en la espiga, mientras la sequía durante el llenado del grano tiene sus efectos más negativos en el tamaño y calidad del grano (Kirby y Appleyard, 1984).

El aumento en el rendimiento de grano en ambientes con limitaciones de humedad requiere genotipos con una mejor tolerancia a sequía, combinada con prácticas agrícolas tendientes a maximizar la disponibilidad de agua en el suelo (Passioura, 2006). El mejoramiento genético del rendimiento al utilizar métodos tradicionales de selección con base en el rendimiento *per se*, ha sido muy lento, debido a la alta interacción genotipo x ambiente (G x E) y la baja heredabilidad del rendimiento, que resultan de una combinación de diferencias en adaptación genotípica y variación estacional en cantidad, y distribución de la lluvia durante la estación de crecimiento (Richards, 2006).

La integración de la fisiología con el mejoramiento genético tradicional se ha propuesto como un medio para aumentar la ganancia genética en el mejoramiento del rendimiento (Hammer *et al.*, 2005). En este enfoque los caracteres de la planta que confieren tolerancia a sequía pueden disectarse y los caracteres fisiológicos asociados con un mayor rendimiento se pueden identificar con facilidad. De esta manera, se han identificado algunos caracteres en los órganos aéreos de las plantas y se han utilizado como criterios secundarios de selección en los programas tradicionales de mejoramiento genético (Richards, 2006), mientras las características de las raíces relacionadas con la adaptación a sequía han sido ignoradas, debido al limitado conocimiento sobre el crecimiento y funcionamiento del sistema de raíces, dificultades en la medición de las características de la raíz y la falta de métodos simples y eficaces para la selección (Manschadi *et al.*, 2008).

La variación genotípica para las características de las raíces y sus implicaciones fisiológicas, para la absorción de agua y nutrientes, y el aumento del rendimiento bajo condiciones limitantes de agua se han estudiado por diversos autores en décadas recientes. Los caracteres deseables incluyen la profundidad y densidad de las raíces (Hurd, 1974; López-Castañeda y Richards, 1994a), tasa de elongación de las raíces (O'Brien, 1979), distribución de las raíces en el perfil del suelo (Manske y Vlek, 2002), diámetro de los vasos de xilema (Richards y Passioura, 1989), cociente raíz/parte aérea (Siddique *et al.*, 1990; López-Castañeda y Richards, 1994a), ángulo de las raíces seminales (Sanguinetti *et al.*, 2007; Manschadi *et al.*, 2008) y arquitectura de las raíces (Lynch, 1995; Sanguinetti *et al.*, 2007).

En estudios recientes se ha observado que las variedades antiguas y criollas de trigo producen sistemas de raíces de mayor tamaño que las variedades modernas; un tamaño reducido del sistema radical en las variedades modernas puede limitar la absorción óptima de agua y nutrientes, y el máximo rendimiento de grano (Waines y Ehdaie, 2007).

Al considerar que las características de crecimiento de las raíces se podrían integrar en el análisis de los componentes del rendimiento de trigo, se propone llevar a cabo el presente proyecto de investigación con el objetivo e hipótesis siguientes:

## **II. OBJETIVO E HIPÓTESIS**

### **2.1 Objetivo general**

Determinar, si los trigos antiguos tienen capacidad de producir más raíces que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos bajo condiciones de riego y sequía en invernadero.

### **2.2 Hipótesis**

Los trigos antiguos producen sistemas de raíces más grandes, tienen mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso del agua que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos bajo condiciones de déficit hídrico del suelo.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Arquitectura del sistema de raíces

En un artículo intitulado ‘arquitectura de la raíz y productividad de la planta’, Lynch (1995) hace un recuento de los términos más utilizados para referirse a la forma, en la que las plantas producen sus raíces en relación con la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo. El término ‘arquitectura’ en referencia a organismos biológicos, denota la configuración espacial de un complejo ensamblaje de subunidades, con la implicación de que la configuración completa tiene un significado funcional.

El término ‘arquitectura de las raíces’ se ha utilizado en varios contextos para referirse a diferentes aspectos de la forma de los sistemas de raíces, al considerar importantes los aspectos siguientes:

La morfología de la raíz se refiere a las características superficiales de un eje individual de raíz como un órgano; pelos absorbentes en la epidermis, diámetro de la raíz, patrón de aparición de raíces secundarias, ondulaciones en los ejes de las raíces y senescencia cortical.

La topología de la raíz se refiere a como los ejes de raíces individuales se conectan entre sí a través de las ramificaciones; la topología de las raíces es estable a la deformación o rotación de los ejes y por lo tanto es posible medirlos al excavar los sistemas de raíces.

La distribución de las raíces se refiere a la presencia de raíces en un gradiente posicional; típicamente, los estudios de distribución de las raíces se relacionan con la biomasa o la longitud de las raíces como función de factores como profundidad en el suelo, distancia del tallo y posición entre plantas vecinas. La medición de la distribución de las raíces en comunidades naturales y agrícolas de plantas incluye más de una planta o más de una especie.

La arquitectura de la raíz se refiere a la configuración espacial del sistema radical, p. ej. la geometría explícita de la formación de los ejes de raíces. Usualmente, los estudios de la arquitectura de raíz no incluyen detalles estructurales finos tales como ‘pelos absorbentes’, pero se relacionan con el sistema radical entero o una parte grande del sistema de raíces de una planta individual.

La arquitectura de la raíz como un descriptor de múltiples ejes de raíz es una categoría superior a la topología y la distribución, ya que si se conoce la arquitectura de la raíz también se conoce a la topología y la distribución, mientras ni la topología ni la distribución pueden utilizarse para derivar los otros dos descriptores de la raíz. En consecuencia, la topología y la distribución de la raíz son más fáciles de medir que la arquitectura de la raíz y son más comúnmente utilizadas en estudios de la forma de las raíces.

Lynch (1995) concluye que la arquitectura de la raíz es un aspecto fundamental para la productividad de la planta, especialmente en ambientes caracterizados por la baja disponibilidad de agua y nutrientes. También, indica que se requiere estudiar la relación entre la arquitectura de las raíces, la adaptación de la planta a factores desfavorables del suelo y procesos fisiológicos específicos, especialmente, aquellos que coordinan las respuestas de los distintos ejes de las raíces.

Las raíces en los cultivos anuales representan la mayor demanda de carbono durante las etapas iniciales de crecimiento vegetativo, cuando hasta 50 % de todo el carbono asimilado por la planta puede ser removilizado a las raíces. La floración marca un cambio importante en la asignación de asimilados, especialmente en especies de crecimiento determinado en las que, la disponibilidad de energía para el mantenimiento puede ser insuficiente, sobre todo cuando la planta está sujeta a condiciones de déficit hídrico (Gregory *et al.*, 1997).

El patrón de la distribución de las raíces juega un papel muy importante en la asignación de carbono y el efecto de la contribución del carbono de las raíces del cultivo al balance de carbono del suelo en los agroecosistemas; p. ej. un experimento bajo condiciones de sequía determinó que las plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) mostraron sistemas de raíces más profundos (177 cm) que las plantas de *Festuca arundinacea* Shreb. (78 cm) (Fan *et al.*, 2016).

La respuesta de las plantas de trigo a deficiencias hídricas del suelo ha demostrado que una mayor masa y longitud de raíces, en las capas del subsuelo con un mayor acceso a la humedad disponible en los estratos inferiores del suelo después de la antesis, contribuye a un mayor rendimiento de grano cuando el agua es escasa en el suelo (Fang *et al.*, 2017).

En un grupo de 25 genotipos de trigo duro se observó que un análisis múltiple de caracteres de las raíces y de la parte aérea (p. ej. biomasa de raíces, número de raíces, cociente raíz/parte aérea

y ángulo de la raíz; contenido de clorofila en la hoja bandera, días a madurez, altura de planta, espigas por planta, biomasa aérea, peso del grano, peso de 1000 granos e índice de cosecha), permitió establecer que los genotipos con sistemas de raíces más profundas produjeron 38 % mayor rendimiento de grano y de 10 a 35 % mayor tamaño de grano que los genotipos con sistemas de raíces menos desarrollados (El Hassouni *et al.*, 2018).

La arquitectura de las raíces ofrece potencial para aumentar la accesibilidad a la humedad del suelo, particularmente en condiciones limitantes de agua. En un estudio de la variabilidad en los caracteres arquitecturales del sistema radical en sorgo, se observó que el cultivar ‘Early Hegari-Sart’ (EH, con menor ángulo de crecimiento de raíces seminales y adventicias) mostró mayor biomasa radical, menor ángulo de raíces seminales y adventicias fuertes, mayor densidad de raíces en estratos profundos del suelo (p. ej., 0-45 cm), mayor longitud específica de la raíz (longitud de raíces/g de materia seca de raíz) y mayor longitud de raíz de raíces pequeñas con diámetro < 1 mm que el cultivar ‘Bk7’ (con mayor ángulo de crecimiento de las raíces). Estas características de crecimiento de las raíces en ‘EH’ se reflejaron en una más rápida captura de la humedad del suelo que ‘Bk7’, resultados que sugieren que la manipulación de la arquitectura de las raíces puede hacerse a través de la selección y también a través del manejo del riego, para asegurar el comportamiento óptimo bajo diferentes niveles de humedad en el suelo (Liang *et al.*, 2017).

La captura de agua y nitrógeno es fundamental para el crecimiento del cultivo en condiciones de secano; un crecimiento inicial vigoroso de la parte aérea y la raíz de la planta es la principal característica que mejora la capacidad del trigo para capturar nitrógeno y agua; un genotipo vigoroso de trigo (Vigour 18) tuvo mayor biomasa total, biomasa de raíces, longitud de raíces, área de la superficie de la raíz, profundidad de raíces, nitrógeno total y tasa de específica de absorción de la raíz a los 35 días después de la siembra en un suelo arenoso en condiciones de campo en Australia Occidental (Liao *et al.*, 2004).

### **3.2 Rendimiento de grano y sus componentes**

La sequía afecta negativamente al rendimiento de grano del trigo y sus componentes. En un estudio que incluyó 25 genotipos derivados de la población Seri-Babax-Seri (CIMMYT, México), establecidos en campo bajo condiciones de riego (disponibilidad de humedad cercana a

CC de la siembra a la madurez) y sequía (sólo se aplicó el riego de siembra) en Tlaltizapán, Morelos, México, en los ciclos invierno-primavera 1999 y 2000, se determinó que la sequía disminuyó más severamente al rendimiento de grano (55 %), biomasa aérea (50 %), número de granos  $m^{-2}$  (46 %) y granos espiga<sup>-1</sup> (33 %) con respecto a riego, que al número de espigas  $m^{-2}$  (21 %), peso de doscientos granos (17 %) e índice de cosecha (13 %). Adicionalmente, se determinó que las líneas de más alto rendimiento de grano en sequía (LARS) acumularon mayor cantidad de biomasa aérea que las líneas de más bajo rendimiento (LBRS), desde la etapa de embuche hasta la madurez fisiológica, sugiriendo que las LARS desarrollaron una mayor capacidad de removilización de reservas del tallo al grano bajo sequía (López-Castañeda, 2013). La alta capacidad de removilización de asimilados está relacionada positivamente con una alta tasa de crecimiento del grano en trigo, triticale y cebada en condiciones de sequía terminal (López-Castañeda y Richards, 2001).

La arquitectura del sistema radical juega un papel muy importante en la capacidad de adquisición de agua y nutrientes en suelos con limitaciones de humedad: p. ej., Manschadi *et al.* (2006) observaron que las diferencias en arquitectura de las raíces se reflejan en el rendimiento de grano en trigo; la variedad Seri M82 (tolerante a sequía) con una arquitectura de raíces más compacta que la variedad estándar Hartog, tuvo 14.5 % mayor rendimiento de grano bajo sequía, y produjo 55 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento de grano por cada mm adicional de humedad extraída del suelo durante el llenado del grano.

Un aumento en el rendimiento de grano en trigo puede lograrse con una mayor extracción de agua del subsuelo, a través de un mejor manejo agronómico de la humedad edáfica o a través del mejoramiento genético; el incremento en el rendimiento puede ser del orden de 20 % con rápido crecimiento descendente de las raíces y/o una más efectiva extracción de humedad del subsuelo (60 cm) en diferentes ambientes de manejo de la humedad, y distintas texturas del suelo en condiciones de campo en el sureste de Australia (Lilley y Kikegaard, 2011).

La longitud y profundidad de las raíces determinan la velocidad y eficiencia en la captura de nutrientes y agua de las plantas, y estas características son objetivos del mejoramiento genético del rendimiento en condiciones limitantes de humedad. La selección de plantas más eficientes en la adquisición de agua y nutrientes en el perfil del suelo puede hacerse combinando la selección de plántulas en ambientes controlados o en plántulas y plantas adultas en condiciones de campo.

Watt *et al.* (2012) mostraron que la selección de plántulas es rápida, repetible y confiable para identificar líneas con mayor longitud total de raíz en la etapa vegetativa inicial de crecimiento de trigo en campo, pero este método de selección no tuvo correlación positiva con la determinación de los datos de longitud y profundidad de las raíces en la etapa de antesis en campo, debido a las diferencias en las propiedades del suelo, variación del clima y fenología del genotipo. En consecuencia, estos autores sugieren que la selección por características de crecimiento y profundidad de raíz, podría dar mejores resultados si las diferencias genéticas en estas características de planta entre líneas, se identifican en plantas adultas en condiciones de campo con buenos análisis del sitio y número adecuado de repeticiones.

Los rendimientos de los cultivos de secano con deficiencias hídricas son particularmente sensitivos a la disponibilidad de agua durante el establecimiento del número de granos y el llenado del grano, y el acceso a la humedad almacenada en el suelo es crítica durante periodos secos prolongados (White y Kirkegaard, 2010). El aumento en la profundidad y densidad de las raíces en el subsuelo puede contribuir a mejorar el uso del agua a profundidad, especialmente si las raíces tienen acceso a capas de suelo no ocupadas previamente o si la densidad de raíces excede los niveles críticos para la absorción efectiva de agua en capas más profundas (White y Kirkegaard, 2010). El incremento en la cantidad de agua absorbida se puede lograr aumentando la abundancia, distribución espacial y contacto de las raíces con el subsuelo (60 cm); los caracteres genéticos a seleccionar son el contacto raíz-suelo, pelos absorbentes más densos y mayor proliferación de raíces que ocupen los poros del suelo (White y Kirkegaard, 2010).

### **3.3 Evapotranspiración y sus componentes**

La evapotranspiración ( $E_T$ ) o uso del agua es la cantidad de agua utilizada para el crecimiento del cultivo en condiciones de campo o en condiciones controladas durante la estación de crecimiento. La  $E_T$  tiene dos componentes: la evaporación directa de la superficie del suelo ( $E_s$ ) y la transpiración o evaporación ( $E$ ) de la superficie del dosel vegetal de la planta (López-Castañeda y Richards, 1994b). En condiciones de invernadero o cámaras de crecimiento se pueden emplear macetas de plástico o tubos de PVC, donde el manejo de la humedad del suelo permite evitar las pérdidas de humedad debidas a la  $E_s$  y la evaluación de  $E$ , se puede realizar en forma más efectiva y precisa.

La  $E_T$  depende de la precipitación (factor no controlable); la humedad almacenada en el perfil del suelo al momento de la siembra, la cual se puede controlar a través de periodos de descanso del terreno, es decir ciclos agrícolas o años sin siembra; la cantidad de agua perdida por las malezas; y evaporación directa del suelo la cual depende de una compleja interacción entre la lluvia y su distribución, el área foliar, la geometría de las hojas y las propiedades del suelo. La evaporación también depende de un buen manejo agronómico; una penetración efectiva de las raíces en el frente de humedecimiento del suelo, el cual contiene casi toda la humedad disponible para el cultivo; y selección de plantas con un sistema radical vigoroso y profundo; la consideración de todos estos factores seguramente contribuirá incrementar el rendimiento sustancialmente en ambientes con limitaciones de humedad en el suelo (Passioura, 1977).

El incremento del rendimiento de grano del cultivo por unidad de ‘agua escaza’ requiere ambos, mejores cultivares y mejor agronomía. El reto es manejar el cultivo o mejorar su genética para capturar más de la humedad disponible, para su uso en la transpiración; intercambiar agua transpirada por  $CO_2$  más efectivamente en la producción de biomasa; y convertir más de la biomasa en grano u otros productos cosechables (Passioura, 2006).

En condiciones de campo el límite superior de la eficiencia en el uso del agua o ‘productividad del agua’ de cultivos de cereales bien manejados sin enfermedades y en condiciones limitantes de agua es típicamente  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (rendimiento de grano por unidad de agua evapotranspirada). Sí la productividad es marcadamente menor que este valor, es posible que otros estreses aparte del agua estén influyendo, tales como malezas, enfermedades, baja nutrición o suelo inhóspito. De esta manera los más altos avances deberán venir de eliminar estos factores desfavorables (Passioura, 2006).

Cuando el agua es el principal factor limitante del rendimiento, hay posibilidades de mejorar la productividad a través de una mejor sincronización del desarrollo del cultivo con el patrón de disponibilidad de agua, al reducir las pérdidas evaporativas y otras pérdidas (escurrimientos e infiltración a mayor profundidad en el perfil del suelo), favoreciendo un buen balance del ‘agua productiva’ antes y después de la antesis, la cual es necesaria para obtener un alto índice de cosecha (p. ej., rendimiento de grano/biomasa aérea del cultivo) (Passioura, 2006). Hay también alternativas para desarrollar genotipos con habilidad para mantener una fertilidad femenina adecuada a pesar de sufrir déficits severos de estrés hídrico durante el desarrollo floral. La

utilización de marcadores moleculares en la selección ha contribuido a controlar algunas enfermedades que limitan el desarrollo, la absorción de agua y ayudan a mantener la fertilidad en maíz en condiciones de estrés hídrico. Además de la resistencia a herbicidas en cultivos, la cual ayuda reducir la competencia por agua con las malezas, no hay otra transformación genética en el término inmediato que ayude a mejorar la ‘productividad del agua’ más eficazmente (Passioura, 2006).

Por otra parte, el cambio climático global también tiene efecto en la disponibilidad de recursos con serios impactos en la evaporación de la superficie del suelo ( $E_s$ ), transpiración (T) de los cultivos y rendimiento de grano, el cual está relacionado con la eficiencia en el uso del agua del cultivo. En un estudio de la evapotranspiración ( $E_T$ ) y sus componentes en trigo conducido en Kenilworth, South África, en la variedad de trigo SST 826 se determinó que no hubo diferencia significativa en la  $E_T$  y la partición de sus componentes, pero sí se observaron diferencias significativas en el rendimiento de grano, indicando que la reducción en las pérdidas por evaporación mejoró la productividad del agua, la cual tiene implicaciones importantes para los cultivos de secano (Tfwala *et al.*, 2021). La reducción en las pérdidas por evaporación directa del suelo es un factor muy importante para mejorar el rendimiento de grano cuando la cantidad de agua disponible en el suelo es limitada; p. ej., los genotipos de cebada con una  $E_T$  similar a la de trigo harinero, triticale y avena en condiciones de secano con sequía terminal en el sureste de Australia, produjo 20 % mayor rendimiento de grano que los otros cereales debido a una disminución de 20 mm en la  $E_s$  durante la estación de crecimiento con respecto a las otras especies (López-Castañeda y Richards, 1994b).

### **3.4 Eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria**

El mejoramiento de la eficiencia en el uso del agua y la eficiencia transpiratoria en los agrosistemas de secano y riego es un imperativo urgente, dadas las condiciones de cambio climático y frecuentes fenómenos meteorológicos de déficit hídrico. La agricultura de riego consume alrededor del 80 % del agua disponible para las actividades de carácter antropocéntrico. Este nivel de consumo de agua no será sustentable en el futuro al considerar el alto crecimiento de la demanda poblacional humana, la cual seguramente obligará a la redistribución del volumen de agua disponible a un 50 % para otras actividades humanas (Condon *et al.*, 2004). Sin embargo, el aumento en la población no requerirá únicamente más agua para estas otras

necesidades, sino que también necesitará la producción de alimentos y vestido correspondientes. Esto necesitará producción sustancialmente más eficiente al disponer de un recurso hídrico más pequeño para riego y también requerirá sustancialmente mayor eficiencia en el uso del agua para los agrosistemas de secano, la cual permanece como el medio primario de producción de alimentos en la mayoría de países y para la mayoría de agricultores (Condon *et al.*, 2004).

El mejoramiento genético de nuevas variedades que sean más eficientes en el uso del agua es la principal estrategia. Otra estrategia incluye un mejor manejo del agua y del cultivo; para garantizar el éxito de estas estrategias, deberán trabajarse en forma combinada (Condon *et al.*, 2004). El aumento en la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento se podrá lograr en la medida que las plantas reduzcan más su conductancia estomática a la pérdida de agua que a la asimilación de CO<sub>2</sub>, debido a que el crecimiento de las plantas depende principalmente del intercambio gaseoso [pérdida de agua del tejido en forma de vapor (transpiración) y entrada de CO<sub>2</sub> al interior de la hoja (fotosíntesis)], el cual ha mostrado variabilidad genética y está regulado por la conductancia estomática (López-Castañeda, 1993).

La eficiencia transpiratoria (ET) se define como la masa de materia seca producida por el cultivo/unidad de transpiración del cultivo. El interés en este carácter intrínseco de la planta tiene su origen en el hecho que hace más de un siglo que Briggs y Shantz (1913), observaron la existencia de variación genética en eficiencia en el uso del agua y poco progreso se ha logrado en el mejoramiento de la ET básica en especies gramíneas y leguminosas.

El poco progreso en la ganancia genética en la ET se debe a que el potencial de mejoramiento puede ser muy limitado para especies cultivadas, que ya han estado sujetas a selección enfocada simplemente en el rendimiento mejorado en ambientes con déficit hídrico. La ET intrínseca es limitada por C<sub>i</sub> (concentración intercelular de CO<sub>2</sub>), la cual parece tener límites bien establecidos con valores máximos de C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub> (C<sub>a</sub>, concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>) de aproximadamente 0.3 a 0.7 para especies C<sub>4</sub> y C<sub>3</sub>, respetivamente (Sinclair, 2018). Desde luego, sí los cultivares modernos se desvían sustancialmente arriba de estos límites, entonces el potencial para el mejoramiento de ET claramente existe. Incluso en este caso, el enfoque más directo para el mejoramiento, puede ser simplemente la selección por rendimiento superior bajo condiciones específicas de déficit hídrico (Sinclair, 2018).

Es interesante considerar la posibilidad de poner mayor atención en la dinámica temporal de la evapotranspiración a través de la estación de crecimiento, para mejorar el ‘uso efectivo del agua’ que podría reflejarse en mayor ganancia en rendimiento que la ET (Blum, 2009). Esta posibilidad en mayor medida se enfoca a una disminución de la evapotranspiración al inicio de la estación de crecimiento o ciclo de déficit hídrico, para incrementar la disponibilidad de agua que pueda ser utilizada en la actividad fisiológica durante el llenado del grano; la sequía durante el llenado del grano, especialmente aquellos déficits de agua que causan la terminación prematura del crecimiento de la semilla, pueden tener grandes impactos en el rendimiento de grano (Sinclair, 2018).

Estudios de simulación realizados bajo un rango de condiciones que mejoran los caracteres de conservación del agua en la planta, pueden resultar en altas probabilidades de incremento del rendimiento y los incrementos absolutos del rendimiento en ambientes más secos pueden ser sustanciales. La investigación para introducir estas variadas opciones en los cultivares comerciales, para incrementar el ‘uso efectivo del agua’ parece mucho más prometedor que la búsqueda incompleta para mejorar una ET estática del siglo pasado (Sinclair, 2018).

### **3.5 Selección para resistencia a sequía en caracteres de las raíces**

El mejoramiento genético del rendimiento tradicionalmente se ha llevado a cabo, utilizando al rendimiento de grano como unidad de selección; en algunos casos se ha incluido a la fenología y alguno o algunos de los componentes numéricos del rendimiento (p. ej., número de hileras, longitud de mazorca, número de granos por hilera y peso del grano en maíz; índice de cosecha, número de espigas, granos por espiga y peso de 1000 granos en trigo, etc.) (*del dominio común*), pero los caracteres del crecimiento de las raíces han sido ignorados completamente y la mitad oculta de la planta, no ha sido sometida a ninguna presión de selección (Waines y Ehdaie, 2007).

En un futuro cercano, la frecuente ocurrencia de deficiencias hídricas o sequías, y el calentamiento atmosférico resultado del cambio climático, los cultivos estarán sujetos a mayores niveles de estrés ambiental y estos cambios resultarán en mayores reducciones en el rendimiento y la calidad de la producción. Bajo esta perspectiva, el mejoramiento genético del rendimiento se deberá enfocar a la selección de variedades con capacidad de aumentar el acceso a la humedad

almacenada en el suelo durante el desarrollo del grano, la cual es dos veces más valiosa para el rendimiento que el agua capturada en la etapa de desarrollo vegetativo (Wasson *et al.*, 2014).

La ganancia en rendimiento deberá venir de una mayor velocidad en la identificación de caracteres benéficos y la disponibilidad de los genotipos con estos caracteres a los fitomejoradores, de tal forma que estos caracteres puedan ser incorporados en nuevas variedades, para aumentar el rendimiento más rápido que al seleccionar únicamente por el rendimiento de grano (Richards *et al.*, 2010).

Un sistema de raíces más profundo, como carácter de selección para incrementar el rendimiento en condiciones limitantes de humedad ha mostrado que genotipos de trigo con mayor crecimiento del sistema radical en el perfil del suelo, tienen ventajas en rendimiento en ambientes donde el agua está disponible a mayor profundidad en el perfil del suelo durante el llenado del grano (Manschadi *et al.*, 2006; Lilley y Kirkegaard, 2011). Así mismo, se ha demostrado con mediciones directas de la raíz y humedad del suelo en campo, que incrementos en la profundidad del sistema radical (hasta 30 cm) pudieron capturar 10 mm extras de humedad del suelo durante el desarrollo del grano (entre la anthesis y la madurez fisiológica), lo cual se tradujo en 0.5 t extras de grano por hectárea; esta humedad edáfica del subsuelo es valiosa porque contribuye directamente a la movilización de carbohidratos al grano (Kikegaard *et al.*, 2007). Un sistema radical profundo es un carácter útil para estabilizar los rendimientos entre diferentes estaciones de crecimiento; el agua a mayor profundidad está protegida de la evaporación y es parcialmente predecible porque se puede medir y algunas veces es manipulada por el agricultor antes de la siembra del cultivo (Wasson *et al.*, 2012).

Finalmente, dos consideraciones importantes en la selección de genotipos con sistemas de raíces profundas deben hacerse: (i) las raíces profundas en trigo se expresan en plantas maduras y (ii) el crecimiento de las raíces es altamente influenciado por factores edáficos, haciendo difícil su estudio en condiciones de laboratorio. Por lo tanto, en contraste con los enfoques usuales, deberá haber una ventaja al seleccionar primero genotipos superiores en condiciones de campo, para acelerar la identificación del mejor germoplasma para su uso en los programas de mejoramiento genético (Wasson *et al.*, 2012).

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Localización del sitio experimental

El presente estudio se realizó en tubos de PVC en condiciones de invernadero, en el área de resistencia a sequía, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Montecillo, Texcoco, Estado de México (19°27'N, 98°54'O y 2250 msnm) en el ciclo verano-otoño 2019. Las condiciones climatológicas prevalecientes en el sitio del experimento corresponden a un clima templado subhúmedo (García, 2004), con temperatura y precipitación promedio anual de 17.2 °C y 599 mm (García, 2004).

### 4.2 Germoplasma

El material genético utilizado incluyó dos variedades antiguas de trigo con sistemas de raíces grandes; cuatro genotipos comerciales del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, México); tres líneas isogénicas con la translocación del brazo corto del cromosoma 1 de centeno en el brazo corto del cromosoma 1A, 1B y 1D de la variedad de trigo Pavón F-76 (Lukaszewski, 2000), con sistemas de raíces grandes (Ehdaie *et al.*, 2012); dos variedades modernas de trigo y dos líneas experimentales de triticales procedentes de California, Estados Unidos de América; un genotipo moderno de trigo procedente de Inglaterra, y dos líneas de cebada procedentes de México y los Estados Unidos de América, respectivamente (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Germoplasma de trigo, triticale y cebada, utilizado en el experimento de riego y sequía en condiciones de invernadero. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Número de genotipo	Genealogía	Especie	País de origen	Año de liberación o colecta
<b>Trigos antiguos</b>				
1	Gabo	<i>Triticum aestivum</i> L.	Australia	1945
2	Marroquí	<i>Triticum aestivum</i> L.	Marruecos	1948
3	Criollo 'Venturero'	<i>Triticum aestivum</i> L.	Oaxaca, México	2015
<b>Trigos intermedios de la revolución-verde</b>				
4	Yécora Rojo	<i>Triticum aestivum</i> L.	INIFAP, México	1972
5	Cleopatra VS-74	<i>Triticum aestivum</i> L.	INIFAP, México	1974
6	Pavón F-76	<i>Triticum aestivum</i> L.	INIFAP, México	1976
<b>Trigos modernos</b>				
7	Pavón F-76 IRS 1AL	<i>Triticum aestivum</i> L.	CA, EEUU	2000
8	Pavón F-76 IRS 1BL	<i>Triticum aestivum</i> L.	CA, EEUU	2000
9	Pavón F-76 IRS 1DL	<i>Triticum aestivum</i> L.	CA, EEUU	2000
10	Náhuatl F-2000	<i>Triticum aestivum</i> L.	INIFAP, México	2000
11	Blanca Grande	<i>Triticum aestivum</i> L.	CA, EEUU	2005
12	Zion	<i>Triticum aestivum</i> L.	Inglaterra	2005
<b>Cebada</b>				
13	Esperanza x Cerro Prieto CPRSC-5-2M-2MR-7M- OMR (Línea 2)	<i>Hordeum vulgare</i> L.	COLPOS, México	2000
14	Lenetah	<i>Hordeum vulgare</i> L.	EEUU	2007
<b>Triticale</b>				
15	Triticale-105	<i>Triticosecale</i> Wittmack	CA, EEUU	2000
16	Triticale-118	<i>Triticosecale</i> Wittmack	CA, EEUU	2000

### 4.3 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en riego (R, manteniendo el contenido de humedad edáfica cercana a CC=Capacidad de campo de la siembra a la madurez) y cuatro en sequía [S, con suspensión de riego desde los 52 ddt (días después del trasplante) hasta la madurez, iniciando en la fecha que los primeros genotipos alcanzaron la antesis] bajo condiciones de invernadero. La unidad experimental fue una planta

crecida en un tubo de PVC de 1 m de alto y 4" de diámetro. También se incluyó un tubo de PVC, sin planta en cada bloque para estimar las pérdidas de humedad por evaporación directa del suelo (Es). El suelo utilizado fue de textura franco-arenoso con capacidad de campo (CC) de 30 % y porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) de 21.5 %. Se utilizaron semillas del mismo peso (35 mg) para todos los genotipos, excepto, para las variedades de cebada que al conservar las glumas adheridas al grano tuvieron un peso de 38 mg. Las semillas se trataron con una solución de hipoclorito de sodio a una concentración de 1 % y se colocaron en cajas Petri (20 de julio de 2019), para llevar a cabo la germinación. Las plantas se trasplantaron en los tubos de PVC el 23 de julio de 2019. Se aplicó la dosis de fertilización 120-60-60 diluida en el agua de riego en todas las unidades experimentales, utilizando urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio, a los 31 ddt.

#### **4.4 Variables medidas**

**Antesis (A);** se determinó como el número de ddt requerido para que las espiguillas centrales de la espiga del tallo principal mostraran las anteras en dehiscencia y expuestas fuera de las glumas y la palea en los genotipos de trigo y triticale; en cebada el número de días a antesis se determinó, al examinar, las espiguillas centrales con la espiga cubierta por la vaina de la hoja bandera.

**Peso seco de la parte aérea (PSPA, g);** se determinó al obtener el peso seco total de todos los órganos aéreos de la planta en la madurez fisiológica.

**Número de espigas por planta ( $E \text{ Pl}^{-1}$ );** se contó como el número de espigas con granos o al menos un grano en las plantas.

**Número de granos por planta ( $G \text{ Pl}^{-1}$ );** se contó el número total de granos por planta después de desgranar las espigas.

**Tamaño del grano (TG, mg);** se determinó al dividir el peso total de los granos entre el número de granos producidos por la planta.

**Rendimiento de grano (RG, g);** se obtuvo al separar y pesar el grano producido en las espigas del tallo principal y los macollos.

**Índice de cosecha (IC);** se calculó al dividir el rendimiento de grano entre el peso seco de la parte aérea ( $IC = RG/PSPA$ ).

**Longitud total de las raíces (LTR, cm);** se obtuvo al medir la longitud de la raíz visible más larga en cada columna de suelo, después cosechar los órganos aéreos de las plantas.

**Peso seco total de raíces (PSTR, g);** se obtuvo al sumar el peso seco de las raíces producidas por las plantas en los diferentes estratos del suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80 a 100 cm). En la madurez fisiológica, las raíces se separaron del suelo en cada estrato con una criba metálica y unas pinzas de disección, y se colocaron en sobres de papel. Posteriormente, las muestras de raíces se llevaron a una estufa marca RIOSSA y se sometieron a secamiento, a una temperatura de 70 °C durante 48 h. El peso seco se obtuvo con una balanza de precisión marca Sartorius.

**Biomasa total (BMT, g PI<sup>-1</sup>);** se calculó al sumar el PSTR+PSPA.

**Cociente raíz/parte aérea (CRPA);** se determinó al dividir el peso seco total de raíces entre el peso seco de la parte aérea.

### **Evapotranspiración y sus componentes**

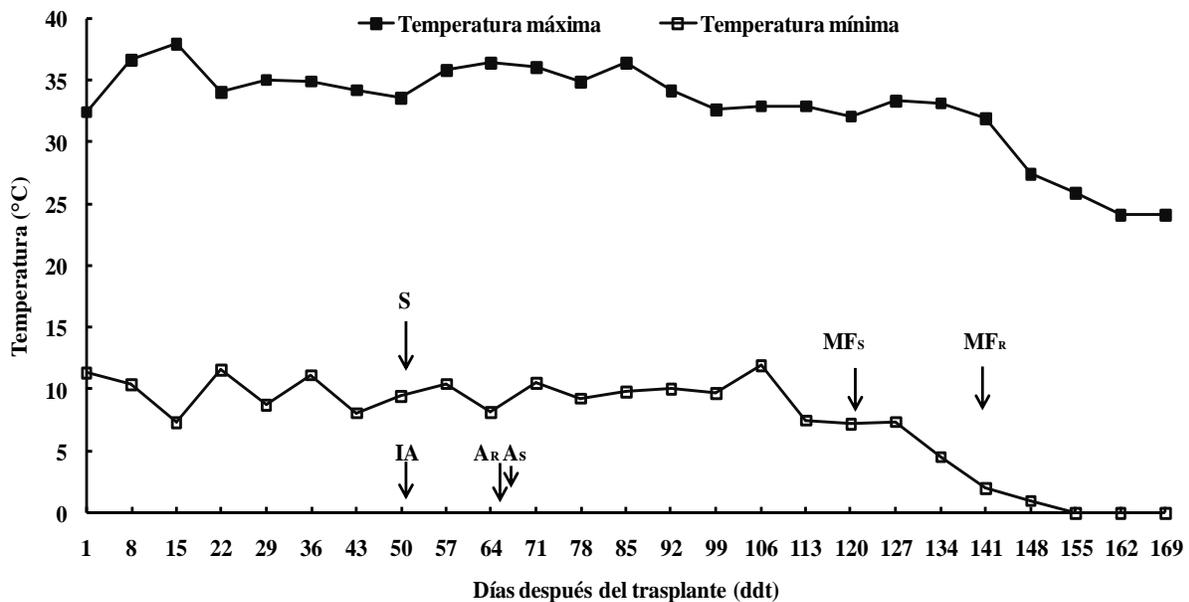
La evapotranspiración ( $E_T$ ) en cada tubo se calculó como la cantidad de agua extraída por la planta entre las fechas consecutivas de medición. La  $E_T$  se calculó como la diferencia entre el PICC y el peso del tubo registrado en cada fecha de medición ( $E_T = PICC - \text{Peso del tubo}$ ). La  $E_T$  se separó en sus componentes: transpiración (T) de la planta y pérdida por evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) ( $E_T = T + E_{SPI}$ ). La proporción de  $E_{SPI}$  se estimó al multiplicar los valores de  $E_S$  (de los tubos sin planta) x 0.70 (factor de evaporación de humedad del suelo debajo de la planta), estimado al dividir el porcentaje de pérdida de humedad del suelo debajo del dosel del cultivo de diferentes cereales de grano pequeño ( $E_{SC}$ ) entre el porcentaje de la pérdida de humedad del suelo desnudo sin plantas ( $E_S$ ), representando un valor aproximado de 70 % (López-Castañeda, 1993; López-Castañeda y Richards, 1994b). La T se calculó al substrair los valores de  $E_{SPI}$  de los valores de  $E_T$  ( $T = E_T - E_{SPI}$ ).

**Eficiencia en el uso del agua (EUA, g de MS/kg de H<sub>2</sub>O evapotranspirada);** se calculó al dividir la materia seca total o biomasa producida por la planta entre la cantidad de agua extraída del suelo o evapotranspirada por la planta durante su ciclo biológico.

**Eficiencia transpiratoria** (ET, g de MS/kg de H<sub>2</sub>O transpirada); se calculó al dividir la materia seca total o biomasa total producida por la planta entre la cantidad de agua transpirada (T) por la planta durante su ciclo biológico.

#### 4.5 Temperatura

Los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias del aire dentro del invernadero se registraron cada 10 minutos con un datalogger marca HOBO, Modelo U12, colocado a una altura de 1.80 metros sobre el nivel del piso (Figura 1).



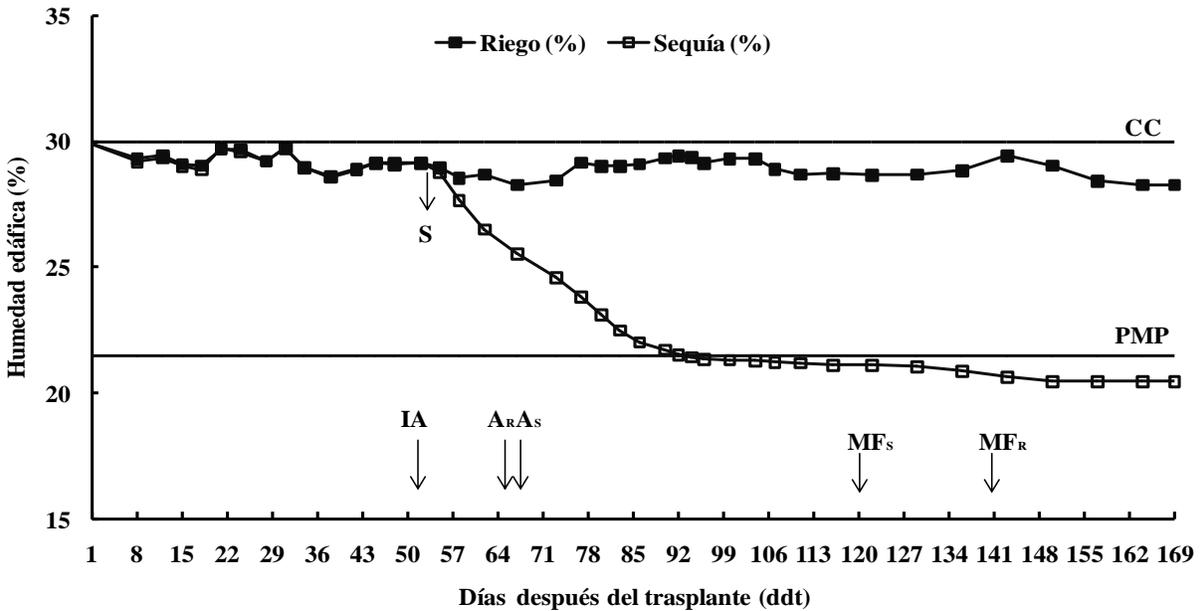
**Figura 1. Temperatura máxima y mínima semanal durante el experimento en invernadero. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. S=Inicio del tratamiento de sequía; CC=Capacidad de campo; PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente; IA=Inicio de antesis; AR=Antesis en riego; AS=Antesis en sequía; MF<sub>R</sub>=Madurez fisiológica en riego y MF<sub>S</sub>=Madurez fisiológica en sequía.**

#### 4.6 Contenido hídrico edáfico

El peso inicial del suelo a CC (PICC) se determinó 24 h después de alcanzar el punto de saturación de agua y una vez que el escurrimiento o drenaje del exceso de humedad cesó en los tubos de PVC completamente. El contenido de humedad aprovechable (HA) del suelo se determinó al pesar los tubos de PVC con las plantas cada tercer día durante el experimento (Figura 2), empleando una balanza electrónica marca Torrey, con precisión de 10 g. El porcentaje de HA (%) se determinó en cada unidad experimental como:

$$\% HA = \frac{\text{Peso del tubo x CC del suelo}}{\text{PICC}}$$

donde, el peso del tubo es el peso (kg) obtenido en cada fecha de medición, CC es el valor de capacidad de campo (30 %) obtenido en el Laboratorio de física de suelos del Colegio de Postgraduados y PICC es el peso inicial del tubo a CC (kg).



**Figura 2.** Contenido hídrico edáfico en riego y sequía durante el experimento. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. S=Inicio del tratamiento de sequía; CC= Capacidad de campo; PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente; IA=Inicio de antesis; AR=Antesis en riego; AS=Antesis en sequía; MF<sub>r</sub>=Madurez fisiológica en riego y MF<sub>s</sub>=Madurez fisiológica en sequía.

#### 4.7 Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el procedimiento GLM de SAS (SAS, 2021), utilizando el modelo estadístico que se describe a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + A_i + B_j + A*B_{ij} + e_{ijk}$$

donde,  $Y_{ijk}$  representa la variable de respuesta;  $\mu$  es la media general,  $\beta_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo nivel del bloque o repetición,  $A_i$  es el efecto del  $i$ -ésimo nivel de humedad edáfica,  $B_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo nivel de genotipos,  $A*B_{ij}$  es el efecto de la interacción de los niveles de humedad del suelo x el genotipo, y  $e_{ijk}$  es el error experimental. La comparación de medias se realizó con la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS,  $p \leq 0.05$ ) entre genotipos, pares de grupos de trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde, trigos modernos, cebada y triticale. También, se hizo un análisis de componentes principales, utilizando el programa Statgraphics (2021).

### V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 Temperatura y humedad del suelo

Las temperaturas máximas y mínimas del aire mostraron rangos de variación de 24 a 38 °C y de 0 a 12 °C durante el experimento (Figura 1). La temperatura máxima mostró valores entre 35 y 38° C desde la etapa inicial de crecimiento hasta la madurez fisiológica, y la temperatura mínima presentó sus valores más bajos (de 12 a 0 °C), en la parte terminal del periodo de llenado de grano, entre los 106 a 169 ddt (Figura 1). Las altas temperaturas (25-35 °C) causan estrés a las plantas de trigo al disminuir la germinación, área foliar, contenido de clorofila, tasa de fotosíntesis, capacidad fotosintética, removilización de fotoasimilados, rendimiento y calidad del grano (acumulación de carbohidratos, gluten y proteínas); el calor también reduce la altura de planta, acelera la senescencia de las hojas y acorta el ciclo biológico (Poudel y Poudel, 2020). En las etapas de anthesis y formación del grano, el calor reduce el número de granos, el periodo de llenado del grano, el peso y rendimiento de grano (Porter y Gawith, 1999).

El contenido de humedad del suelo en riego se mantuvo cercano a CC durante el ciclo biológico de las plantas, mientras el contenido hídrico edáfico en sequía empezó a disminuir al suspender la aplicación de agua a los 52 ddt, una vez que las primeras variedades de trigo iniciaron su

proceso de floración o antesis (Figura 2). El déficit hídrico del suelo fue más acentuado con el transcurso del ciclo biológico de las plantas, alcanzando niveles inferiores al PMP del suelo desde los 94 ddt hasta la madurez fisiológica de las plantas (Figura 2). El déficit hídrico edáfico durante la floración disminuye la producción de fotoasimilados, la fertilidad de las espiguillas y el peso del grano (Tiwari *et al.*, 2017). Las deficiencias hídricas del suelo pueden causar reducciones significativas en el rendimiento de grano de trigo (40 %) y cebada (60 %) (Mwadingeni *et al.*, 2016).

## 5.2 Análisis estadístico

En riego y sequía se detectaron diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos para el rendimiento de grano, índice de cosecha, biomasa total de planta, peso seco de la parte aérea, espigas planta<sup>-1</sup>, granos planta<sup>-1</sup> y tamaño del grano (Cuadro 1A). El análisis combinado mostró diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre bloques para el índice de cosecha; significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre niveles de humedad del suelo para el rendimiento de grano y todos sus componentes; significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos para el rendimiento de grano y todos sus componentes; y diferencias ( $p \leq 0.05$ ) en la interacción genotipo\*niveles de humedad del suelo, para el rendimiento de grano y todos sus componentes (Cuadro 1A).

La variabilidad en las características de crecimiento de las raíces y la arquitectura del sistema radical en los diferentes estratos del suelo también fue significativa ( $p \leq 0.05$ ) en riego y sequía, y en la interacción genotipo\*niveles de humedad del suelo. En riego se detectó significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre bloques para la longitud total de raíces; diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos para la longitud total de raíces, peso seco total de raíces, y la arquitectura del sistema radical representada por el peso seco de raíces en todos los estratos del perfil del suelo, así como en el cociente raíces/parte aérea de la planta (Cuadro 2A). También, en sequía se observó significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos para todos los caracteres de crecimiento medidos en las raíces (Cuadro 2A). El análisis combinado detectó significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre niveles de humedad edáfica y entre genotipos, para todos los caracteres determinados en las raíces; la interacción genotipo\*niveles de humedad edáfica exhibió diferencias ( $p \leq 0.05$ ) para los caracteres medidos en las raíces, excepto, para la longitud total de raíces y el peso seco de raíces en el estrato de 20-40 cm (Cuadro 2A).

En riego y sequía se detectaron diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos para la evapotranspiración, transpiración y evaporación del suelo debajo de la planta, la eficiencia transpiratoria y la eficiencia en el uso del agua (Cuadro 3A). El análisis combinado detectó significancia ( $p \leq 0.05$ ) entre niveles de humedad edáfica, entre genotipos, y en la interacción genotipo\*niveles de humedad edáfica, para la evapotranspiración, transpiración y evaporación del suelo debajo de la planta, la eficiencia transpiratoria y la eficiencia en el uso del agua (Cuadro 3A).

### 5.3 Rendimiento de grano y sus componentes

Las plantas en riego mostraron mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, biomasa total, peso seco de la parte aérea, número de espigas, granos por planta y tamaño del grano que las plantas en sequía (Cuadro 2). El déficit hídrico del suelo disminuyó el rendimiento de grano, peso seco de la parte aérea, número de granos y espigas por planta, biomasa total, tamaño del grano e índice de cosecha en 57, 49, 41, 32, 30, 23 y 16 %, respectivamente (Cuadro 2). La reducción del 57 % en el rendimiento de grano bajo sequía estuvo determinada en gran medida por una disminución de 49, 41, 32, 30 y 23 % en el peso seco de la parte aérea, número de granos por planta, espigas por planta, biomasa total y tamaño del grano (Cuadro 2). Ehdaie *et al.*, (2008) determinaron que el rendimiento de grano en trigo bajo sequía disminuyó 43 %, debido a una reducción de 26 y 11 % en el peso del grano y el número de granos; asimismo, observaron que la sequía redujo la tasa de asimilación y la cantidad de reservas del tallo en 54 y 11 %, con un aumento de 37 a 65 % en la contribución de las reservas del tallo al rendimiento de grano. Lemma *et al.* (2021) también observaron que el déficit hídrico del suelo redujo el rendimiento de grano, granos por espiga, número de granos por espiga y peso de 1000 granos.

**Cuadro 2. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E  $PI^{-1}$ ), granos por planta (G  $PI^{-1}$ ) y tamaño del grano (TG) en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	RG (g $PI^{-1}$ )	IC	BMT (g $PI^{-1}$ )	PSPA (g $PI^{-1}$ )	E $PI^{-1}$	G $PI^{-1}$	TG (mg)
Riego	7.5	0.32	26.8	23.8	7.1	218.5	33.8
Sequía	3.3	0.27	18.7	12.2	4.8	128.1	26.3
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.5	0.01	1.7	1.4	0.5	15.2	0.8

En riego cebada mostró mayor rendimiento de grano, biomasa total, peso seco de la parte aérea, granos planta<sup>-1</sup> y tamaño del grano que trigo; la cebada exhibió mayor tamaño de grano que

triticale; y triticale produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, biomasa total, peso seco de la parte aérea, número de granos planta<sup>-1</sup> y tamaño del grano que los genotipos de trigo (Cuadro 3). En sequía cebada produjo mayor índice de cosecha, número de espigas planta<sup>-1</sup> y granos planta<sup>-1</sup>, y tamaño del grano que trigo; cebada mostró menor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de espigas planta<sup>-1</sup> y granos planta<sup>-1</sup>, y mayor tamaño del grano que triticale; y triticale produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, biomasa total, peso seco de la parte aérea, número de granos planta<sup>-1</sup> y tamaño del grano que trigo (Cuadro 3).

La superioridad en rendimiento de grano y sus componentes de cebada respecto a trigo en condiciones de riego ha sido observada en otros estudios; Fischer y Maurer (1978) determinaron que las variedades de cebada tuvieron mayor rendimiento de grano que diferentes genotipos de trigo en condiciones de riego en el Valle del Yaqui, Sonora, México. En condiciones de déficit hídrico del suelo en campo se ha observado que la cebada supera al rendimiento de trigo y triticale, debido a su mayor índice de cosecha, peso del grano y un ciclo biológico más corto (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016).

**Cuadro 3. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E PI-1), granos por planta (G PI-1) y tamaño del grano (TG) para trigo, triticale y cebada en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	RG (g PI <sup>-1</sup> )	IC	BMT (g PI <sup>-1</sup> )	PSPA (g PI <sup>-1</sup> )	E PI <sup>-1</sup>	G PI <sup>-1</sup>	TG (mg)
<b>Riego</b>							
Cebada	13.2	0.35	44.1	37.0	8.6	297.4	44.2
Trigo	5.9	0.31	22.4	20.2	6.7	188.7	31.5
Triticale	11.8	0.37	36.3	31.7	8.0	318.6	37.6
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	2.2	0.04	6.8	5.6	2.1	57.2	2.3
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	2.2	0.04	6.8	5.6	2.1	57.2	2.3
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	2.9	0.05	8.9	7.4	2.8	75.2	3.0
<b>Sequía</b>							
Cebada	3.3	0.21	25.3	15.5	3.0	89.4	37.1
Trigo	2.9	0.27	16.3	10.8	5.0	125.8	24.0
Triticale	5.3	0.32	26.1	16.9	5.1	180.4	30.0
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.04	3.2	1.8	0.9	30.9	2.3
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.04	3.2	1.8	0.9	30.9	2.3
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	1.0	0.05	4.2	2.4	1.2	40.6	3.0

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación cebada vs. triticale.

Los trigos antiguos mostraron un rendimiento de grano, biomasa total, peso seco de la parte aérea y número de espigas planta<sup>-1</sup> similar al de los trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego (Cuadro 4). En sequía se observó un comportamiento similar al mostrado en riego, en el rendimiento de grano y sus componentes (Cuadro 4). No obstante, la ausencia de diferencias en el rendimiento de grano entre grupos de variedades de trigo, los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos mostraron mayor índice de cosecha y mayor número de granos planta<sup>-1</sup> que los trigos antiguos en riego y sequía; además, los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos exhibieron mayor número de espigas planta<sup>-1</sup> que los trigos antiguos sólo en sequía. Los trigos antiguos tuvieron mayor tamaño del grano que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos en riego y sequía (Cuadro 4).

En un estudio realizado en condiciones controladas de invernadero y campo en Australia Occidental, se observó que un cultivar de reciente liberación (CH1) mostró mayor rendimiento de grano que un cultivar antiguo (CW134) y un cultivar moderno (CH58) en riego en invernadero y campo, y un rendimiento similar al del cultivar moderno (CH58) en condiciones de sequía y secano; estas diferencias en rendimiento de grano entre genotipos se reflejaron también en diferencias en el índice de cosecha, número de espigas y granos, y peso de mil granos (Fang *et al.*, 2017). Dettori *et al.* (2022) observaron reducciones en el rendimiento de grano entre 25-30 % acompañadas de acortamiento de la fecha de antesis y con reducciones del 30 % en la precipitación durante el ciclo del cultivo en diferentes variedades de trigo en condiciones de secano.

**Cuadro 4. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E PI<sup>-1</sup>), granos por planta (G PI<sup>-1</sup>) y tamaño del grano (TG) para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	RG (g PI <sup>-1</sup> )	IC	BMT (g PI <sup>-1</sup> )	PSPA (g PI <sup>-1</sup> )	E PI <sup>-1</sup>	G PI <sup>-1</sup>	TG (mg)
<b>Riego</b>							
Trigo antiguos	4.9	0.23	25.3	22.2	6.6	140.0	35.6
Trigos intermedios de la revolución-verde	5.8	0.35	19.0	17.4	7.3	214.3	26.9
Trigos modernos	6.4	0.33	22.6	20.6	6.5	200.2	31.7
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	2.4	0.04	7.3	6.1	2.3	61.7	2.5
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	2.1	0.04	6.3	5.3	2.0	53.4	2.1
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	2.1	0.04	6.3	5.3	2.0	53.4	2.1
<b>Sequía</b>							
Trigo antiguos	2.2	0.21	17.9	10.9	4.1	81.3	27.9
Trigos intermedios de la revolución-verde	3.2	0.31	15.0	10.5	5.8	158.1	20.5
Trigos modernos	3.1	0.29	16.2	11.0	5.1	131.9	23.8
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.04	3.4	2.0	1.0	33.3	2.5
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.7	0.04	3.0	1.7	0.9	28.8	2.1
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.7	0.04	3.0	1.7	0.9	28.8	2.1

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

La variabilidad en rendimiento de grano y sus componentes entre genotipos en promedio de riego y sequía fue muy amplia; el rango en promedio de riego y sequía fue en el orden de 11, 8, 7, 5, 4, 2 y 2, para espigas planta<sup>-1</sup>, peso seco de la parte aérea, biomasa total, rendimiento de grano, índice de cosecha, granos planta<sup>-1</sup> y tamaño de grano (Cuadro 5). Las variedades 16 y 15 de triticale, y 13 y 14 de cebada produjeron mayor rendimiento de grano que todas las variedades de trigo; adicionalmente, la variedad 16 mostró alto índice de cosecha, peso seco de la parte aérea, y espigas y granos planta<sup>-1</sup>; la variedad 15 exhibió alta biomasa total, peso seco de la parte aérea y granos por planta; las variedades 13 y 14 tuvieron alta biomasa total, peso seco de la parte aérea, y tamaño del grano, respectivamente. Las variedades 11 (trigo moderno) y 4 (trigo intermedio de la revolución-verde); 6 (trigo intermedio), 7 y 9 de trigos modernos, mostraron alto índice de cosecha y espigas planta<sup>-1</sup> (Cuadro 5). La respuesta al déficit hídrico del suelo varía con el genotipo, la etapa fenológica, y la duración e intensidad de la sequía; en condiciones

de campo con sequía terminal durante la floración y el llenado del grano, las variedades antiguas de trigo Criollo ‘Venturero’ y Marroquí, y la variedad moderna de cebada Lenetah produjeron mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, número de espigas m<sup>-2</sup> y granos m<sup>-2</sup> que la variedad intermedia Pavón F-76 y el trigo moderno Náhuatl F-2000, y otros genotipos antiguos y modernos de trigo, triticale y cebada (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016). La sequía disminuyó 48 % el rendimiento de grano, 42 % el periodo de llenado del grano, 30 % el peso de grano y espiga<sup>-1</sup> y, 18 % el peso de 1000 granos en un grupo de 100 genotipos de trigo duro en condiciones de campo; este trabajo de investigación permitió identificar seis variedades con un mejor comportamiento agronómico tanto en condiciones favorable de humedad como en condiciones de déficit hídrico del suelo (Lemma *et al.*, 2021).

**Cuadro 5. Rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E PI<sup>-1</sup>), granos por planta (G PI<sup>-1</sup>) y tamaño del grano (TG) para los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

<b>Genotipo</b>	<b>RG (g PI<sup>-1</sup>)</b>	<b>IC</b>	<b>BMT (g PI<sup>-1</sup>)</b>	<b>PSPA (g PI<sup>-1</sup>)</b>	<b>E PI<sup>-1</sup></b>	<b>G PI<sup>-1</sup></b>	<b>TG (mg)</b>
16	9.0	0.37	28.9	23.8	8.0	270.8	32.6
13	8.3	0.30	33.7	26.1	5.3	213.8	38.0
15	8.2	0.32	33.4	24.8	5.1	228.3	34.8
14	8.1	0.26	35.8	26.5	6.4	173.0	43.3
8	6.3	0.27	27.8	22.1	6.3	197.6	29.8
1	5.7	0.29	23.5	19.3	6.4	186.0	29.4
6	5.5	0.28	24.1	19.7	7.5	216.3	24.8
7	5.4	0.29	23.5	18.8	7.1	200.3	26.2
9	5.2	0.22	26.9	21.6	6.8	154.6	32.0
5	4.4	0.33	15.6	13.2	5.5	182.1	24.0
12	3.9	0.34	13.1	11.3	4.5	129.4	30.0
11	3.8	0.40	11.3	9.4	5.3	154.4	24.9
10	3.7	0.33	14.0	11.5	4.9	160.0	23.6
4	3.5	0.38	11.0	9.4	6.5	160.1	22.4
2	3.3	0.29	14.2	11.5	6.3	84.1	38.5
3	1.8	0.09	27.1	18.8	3.4	61.8	27.5
<b>Media</b>	<b>5.4</b>	<b>0.30</b>	<b>22.7</b>	<b>18.0</b>	<b>5.9</b>	<b>173.3</b>	<b>30.1</b>
DMS (p≤0.05)	1.6	0.04	4.9	3.8	1.5	42.8	2.1

La diferencia riego – sequía representa la disminución del rendimiento de grano y sus componentes, debida al efecto del déficit hídrico del suelo. Las variedades con menor disminución en las características determinadas en la parte aérea de la planta son consideradas

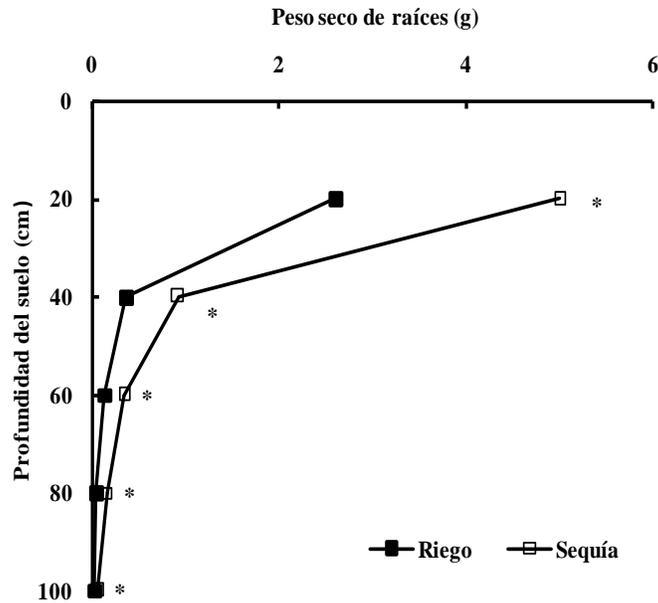
como variedades más estables al pasar de riego a sequía o más tolerantes al déficit hídrico del suelo. Las variedades 10, 12 y 11 (trigos modernos); 4 y 5 (trigos intermedios), y 2 y 3 (trigos antiguos) exhibieron la menor reducción en el rendimiento de grano (Cuadro 6). La menor reducción en el rendimiento de grano de estas variedades estuvo acompañada de una menor disminución en el índice de cosecha, biomasa total, número de espigas y granos planta<sup>-1</sup>; las variedades 11, 4, 10, 12, 2 y 5 también tuvieron menor reducción en el peso seco de la parte aérea. Adicionalmente, las variedades 7, 6, 1 y 15; 6, 7, 1 y 15; 8, 15, 1, 7, 9 y 6; 6, 1 y 15; 2, 4, 13, 16, 7, 9, 10 y 11 tuvieron menor disminución en el índice de cosecha, biomasa total, número de espigas y granos planta<sup>-1</sup>, y tamaño del grano que las demás variedades de trigo, cebada y triticale, respectivamente (Cuadro 6). La reducción en el rendimiento de grano y sus componentes, debido a las deficiencias hídricas del suelo es una medida de la sensibilidad del genotipo a la sequía; los caracteres genéticos de la planta menos afectados por el déficit hídrico, podrían servir en la selección de nuevos cultivares más tolerantes a la sequía, con el uso de métodos convencionales y técnicas moleculares enfocados en la relación entre la tolerancia al estrés hídrico y la expresión de genes específicos para el desarrollo de cultivos adaptados a ambientes desfavorables (Dettori *et al.*, 2022).

**Cuadro 6. Diferencia riego–sequía en rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E PI<sup>-1</sup>), granos por planta (G PI<sup>-1</sup>) y tamaño del grano (TG) para los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	RG (g PI <sup>-1</sup> )	IC	BMT (g PI <sup>-1</sup> )	PSPA (g PI <sup>-1</sup> )	E PI <sup>-1</sup>	G PI <sup>-1</sup>	TG (mg)
16	7.5	0.06	14.8	16.2	4.0	182.5	6.5
13	8.4	0.10	15.2	19.6	4.0	192.0	5.0
15	5.8	0.04	6.5	13.5	1.8	94.0	9.5
14	11.4	0.19	22.5	23.5	7.3	224.0	9.5
8	5.8	0.10	11.9	16.6	1.5	128.7	10.0
1	4.9	0.07	9.3	12.9	2.8	94.0	12.5
6	4.5	0.07	8.2	13.3	3.5	111.0	9.0
7	4.7	0.03	9.9	14.4	2.8	126.5	6.5
9	6.2	0.10	15.0	18.7	3.0	161.3	7.0
5	2.7	0.05	4.2	6.3	1.5	67.7	8.7
12	1.3	0.04	3.0	4.1	1.5	36.2	9.3
11	1.4	0.08	1.2	1.5	0.5	31.7	7.3
10	0.7	0.03	2.5	2.7	1.2	28.0	7.0
4	1.0	0.02	1.8	2.2	1.5	43.7	3.5
2	1.5	0.05	3.7	5.2	1.5	33.2	3.0
3	2.2	0.04	10.5	15.9	3.3	60.0	9.0
<b>Media</b>	<b>4.3</b>	<b>0.07</b>	<b>8.5</b>	<b>11.6</b>	<b>2.5</b>	<b>101.0</b>	<b>7.7</b>
DMS (p≤0.05)	3.2	0.06	10.2	7.8	3.1	86.2	4.6

#### 5.4 Arquitectura del sistema radical

El crecimiento de las raíces, al igual que los órganos aéreos de la planta, es afectado por el déficit hídrico del suelo. A diferencia de la parte aérea de la planta, las raíces acumularon mayor cantidad de materia seca en respuesta a las deficiencias hídricas edáficas. La acumulación de materia seca en las raíces fue más alta en las plantas bajo sequía en todos los estratos desde la superficie del suelo hasta 1 m de profundidad (Figura 3). La densidad de raíces y el ángulo de crecimiento son caracteres genéticos que influyen en el desarrollo de sistemas profundos de raíces, en cultivares de arroz sometidos a sequía en condiciones de campo, donde la compactación del suelo durante el proceso de secamiento del suelo dificulta la penetración de las raíces (Ramalingam *et al.* 2017).



**Figura 3. Peso seco de raíces en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm en promedio de las variedades de cebada, trigo y triticale bajo riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. \*=( $p \leq 0.05$ ).**

En riego las plantas de cebada, trigo y triticale mostraron menor longitud total de raíces, peso seco total de raíces y menor peso seco de raíces que en sequía en los estratos de 0-100 cm, mientras el peso seco total de raíces y el cociente raíz/parte aérea fue mayor en las plantas bajo sequía que en riego (Cuadro 7). La mayor proporción del peso seco de raíces se concentró en el estrato más cercano a la superficie del suelo (0-20 cm) en riego y sequía, y fue menor en los estratos inferiores. En riego la distribución del peso seco de raíces en los distintos estratos del suelo en forma descendente fue 82.8, 11.5, 3.8, 1.3 y 0.6 %, y en sequía fue 77.3, 14.2, 5.3, 2.3 y 0.9 %; la diferencia en el porcentaje de materia seca acumulada en los diferentes estratos del suelo entre riego y sequía fue +5.5, -2.7, -1.5, -1 y -0.3 %; estos datos indican que la asignación de materia seca en el sistema radical de las plantas bajo sequía fue mayor que en riego en los estratos inferiores del suelo, lo que sugiere que el déficit hídrico del suelo modifica la arquitectura de las raíces favoreciendo un mayor desarrollo radical en estratos inferiores del suelo (Cuadro 7). Adicionalmente, la longitud total de raíz en sequía fue 15.1 cm mayor que en riego y el cociente raíz/parte aérea fue 77 % más alto en sequía que en riego (Cuadro 7). Las plantas bajo sequía y deficiencias de nitrógeno en el suelo produjeron mayor peso seco de raíces que las de riego con alto nitrógeno; en promedio la acumulación de materia seca de raíces fue

mayor en las variedades mejoradas de maíz que en las nativas en condiciones de sequía y deficiencia de nitrógeno (Villalobos-González *et al.*, 2018). El peso seco total de raíces (PSTR) y el cociente raíz/parte aérea de 12 variedades comerciales de frijol, cultivadas en condiciones controladas de invernadero fueron 53 y 67 % mayores en sequía que en riego (Romero-Félix *et al.*, 2021).

**Cuadro 7. Longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en los diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA) en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	LTR (cm)	PSTR (g Pl <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
			0-20cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
Riego	75.8	3.14	2.6	0.36	0.12	0.04	0.02	0.12
Sequía	90.9	6.47	5.0	0.92	0.34	0.15	0.06	0.52
DMS (p≤0.05)	3.0	0.6	0.5	0.2	0.05	0.04	0.01	0.04

Al comparar el comportamiento de las variedades de cebada con las de trigo y triticale en condiciones de riego, se observó que cebada produjo mayor peso seco total de raíces que trigo y triticale; y triticale produjo mayor peso seco total de raíces que trigo. Estas diferencias en peso seco de raíces entre especies también se observaron en el estrato de 0-20 cm, donde cebada produjo mayor peso seco de raíces que trigo y triticale; y triticale mostró mayor peso seco de raíces que trigo. Las variedades de cebada mostraron mayor cociente raíz/parte aérea que las de trigo y triticale. Cebada, trigo y triticale mostraron la misma longitud total de raíces y el mismo peso seco de raíces en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm (Cuadro 8).

En sequía cebada y triticale mostraron mayor peso seco total de raíces que trigo; también en el estrato de 0-20 cm cebada y triticale exhibieron mayor peso seco de raíces que trigo. Cebada mostró el mismo peso seco de raíces que trigo y triticale en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-200 cm; la longitud total de raíces y el cociente raíz/parte aérea también fue similar entre especies (Cuadro 8).

La selección por la arquitectura de un sistema radical adaptado a condiciones de déficit hídrico, deberá proveer una solución estratégica para una mejor captura de la humedad; la selección integrativa de multicañales que incluyan, además de la densidad y profundidad de raíces, otros caracteres de la planta como el rendimiento de grano, tamaño del grano, entre otros, podría ayudar a identificar genotipos superiores en condiciones con limitaciones de humedad,

reduciendo el costo y tiempo para una rápida caracterización del crecimiento de la raíz en trigo (Hassouni *et al.*, 2018).

**Cuadro 8. Longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para trigo, triticale y cebada en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	LTR (cm)	PSTR (g Pl <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
			0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
<b>Riego</b>								
Cebada	73.2	7.1	6.0	0.89	0.11	0.05	0.02	0.19
Trigo	76.5	2.2	1.7	0.28	0.13	0.04	0.02	0.10
Triticale	74.1	4.5	4.1	0.30	0.11	0.03	0.02	0.14
<sup>a</sup> DMS(p≤0.05)	10.6	1.6	1.2	0.61	0.08	0.02	0.01	0.04
<sup>b</sup> DMS(p≤0.05)	10.6	1.6	1.2	0.61	0.08	0.02	0.01	0.04
<sup>c</sup> DMS(p≤0.05)	14.0	2.1	1.6	0.80	0.10	0.03	0.01	0.05
<b>Sequía</b>								
Cebada	90.6	9.8	8.2	1.0	0.31	0.14	0.06	0.63
Trigo	90.2	5.5	4.0	0.94	0.35	0.16	0.06	0.49
Triticale	95.3	9.2	8.1	0.71	0.29	0.09	0.04	0.53
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	6.3	2.0	1.6	0.38	0.23	0.16	0.02	0.15
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	6.3	2.0	1.6	0.38	0.23	0.16	0.02	0.15
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	8.3	2.6	2.1	0.50	0.30	0.21	0.03	0.20

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación cebada vs. triticale.

La comparación de las características de crecimiento del sistema radical entre trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego, mostró que las variedades antiguas tuvieron el mismo peso seco total de raíces que las variedades intermedias de la revolución-verde y las variedades modernas. Sin embargo, la forma en que las distintas variedades asignaron materia seca a la raíz fue diferente en los estratos del suelo: los trigos antiguos acumularon mayor peso seco de raíces que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos en los estratos de 40-60, 60-80 y 80-100 cm. Los trigos intermedios de la revolución-verde mostraron una distribución de materia seca similar a los trigos modernos en los estratos de 40-60, 60-80 y 80-100 cm. Así mismo, los trigos antiguos exhibieron una longitud total de raíces y cociente raíz parte aérea similar a los trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos (Cuadro 9). Los cultivares modernos de trigo comparados con los trigos

antiguos crecidos en tubos de PVC de 4" de diámetro y 1 m de alto bajo condiciones de humedad cercanas a CC produjeron menor peso seco de raíces (Waines y Ehdaie, 2007).

En sequía los trigos antiguos produjeron mayor peso seco total de raíces que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos; el peso seco total de raíces de los trigos intermedios de la revolución-verde fue similar al peso seco total de raíces de los trigos modernos. Los trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos presentaron el mismo peso seco de raíces en el estrato de 0-20 cm, sin embargo, los trigos antiguos exhibieron mayor peso seco de raíz que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. También, los trigos antiguos mostraron mayor longitud total de raíz y cociente raíz/parte aérea que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos; los trigos intermedios de la revolución-verde mostraron una longitud total de raíz y cociente raíz/parte aérea similar a los trigos modernos (Cuadro 9). En condiciones de campo, el desarrollo radical es importante para la adaptación del genotipo al déficit hídrico del suelo; más del 50 % de las raíces se concentraron cerca de la superficie del suelo (20 cm) en todos los genotipos de cebada, trigo y triticale, y se observó que el trigo 'Venturero' tuvo mayor densidad de raíces que la cebada y el triticale en los estratos de 20-100 cm; además, el trigo 'Venturero' produjo más raíces que los demás genotipos desde la superficie del suelo hasta los 100 cm (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016).

**Cuadro 9. Longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	LTR (cm)	PSTR (g Pl <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
			0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
<b>Riego</b>								
Trigos antiguos	82.7	3.1	2.2	0.54	0.29	0.06	0.03	0.13
Trigos intermedios de la revolución-verde	78.3	1.5	1.2	0.19	0.07	0.03	0.01	0.09
Trigos modernos	72.5	2.0	1.7	0.20	0.07	0.04	0.01	0.09
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	11.5	1.7	1.3	0.66	0.08	0.02	0.01	0.04
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	9.9	1.5	1.1	0.57	0.07	0.02	0.01	0.04
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	9.9	1.5	1.1	0.57	0.07	0.02	0.01	0.04
<b>Sequía</b>								
Trigos antiguos	96.3	7.0	4.5	1.4	0.70	0.31	0.10	0.70
Trigos intermedios de la revolución-verde	88.0	4.4	3.3	0.78	0.25	0.09	0.04	0.40
Trigos modernos	88.3	5.2	4.1	0.78	0.24	0.11	0.05	0.46
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	6.8	2.1	1.7	0.41	0.25	0.17	0.02	0.16
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	5.9	1.8	1.5	0.36	0.21	0.15	0.02	0.14
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	5.9	1.8	1.5	0.36	0.21	0.15	0.02	0.14

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

La variabilidad genética entre todos los genotipos de cebada, trigo y triticale en longitud total de raíz y peso seco total de raíces fue de 73.2 a 98.1 y de 1.6 a 9.3. Los genotipos de triticale 16 y 15; trigos antiguos 1, 2 y 3; trigos intermedios de la revolución-verde 8, 6, 7, 9 y 5; trigos modernos mostraron mayor longitud total de raíz y las variedades de cebada 13 y 14; y triticale 15 tuvieron mayor peso seco total de raíces que los demás genotipos de cebada, trigo y triticale, respectivamente (Cuadro 10). Los genotipos de triticale 15 y cebada 14 tuvieron mayor peso seco de raíces en el estrato de 0-20 cm, mientras el trigo antiguo 3 mostró mayor peso seco de raíces en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. El trigo antiguo exhibió el más alto cociente raíz/parte aérea (Cuadro 10).

En un estudio de la respuesta de un grupo de genotipos de cebada, trigo y triticale en condiciones de sequía terminal en campo, se determinó que la variabilidad genética en rendimiento de grano

y sus componentes entre genotipos individuales fue substancial; la variedad de cebada Cleopatra produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha y granos espiga<sup>-1</sup> que todos los demás genotipos; además, Cleopatra registró el menor número de días a madurez fisiológica. También, se observaron diferencias entre genotipos para la biomasa aérea final, espigas m<sup>-2</sup>, número de granos m<sup>-2</sup> y altura de planta; Cleopatra, Lenetah , Betzes, Triticale 118, criollo ‘Venturero’, Yaqui 50, Marroquí, Nainari 60, Huamantla, Salamanca S-75, Verano S-91, Romoga F-96, Borlaug M-95 y una línea F<sub>6</sub> de ICARDA, tuvieron mayor biomasa aérea final que los demás genotipos; Betzes y el Triticale 118 produjeron mayor número de espigas m<sup>-2</sup> que los otros genotipos; Cleopatra, Lenetah, Betzes, Triticale 118, criollo ‘Venturero’, Yaqui 50, Nainari 60, Huamantla, Salamanca S-75, Verano S-91, Romoga F-96, Borlaug M-95, Blanca Grande, Rebeca F-2000, Náhuatl F-2000 y la línea F<sub>6</sub> de ICARDA, tuvieron mayor número de granos m<sup>-2</sup> que los demás genotipos; Cleopatra y el criollo ‘Venturero’ obtuvieron mayor peso de 100 granos que los demás genotipos; y Marroquí tuvo la mayor altura de planta (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016).

**Cuadro 10. Longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en los diferentes estratos (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm) y cociente raíz/parte aérea (CRPA) para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	LTR (cm)	PSTR (g Pl <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
			0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
16	84.0	5.1	4.5	0.4	0.14	0.06	0.02	0.25
13	82.0	7.6	6.0	1.3	0.17	0.08	0.03	0.36
15	85.4	8.6	7.7	0.6	0.26	0.07	0.03	0.42
14	81.8	9.3	8.3	0.7	0.26	0.11	0.04	0.46
8	88.7	5.7	4.6	0.7	0.24	0.08	0.04	0.34
1	88.5	4.2	3.4	0.5	0.21	0.09	0.05	0.29
6	86.0	4.9	3.8	0.6	0.29	0.08	0.03	0.34
7	86.5	4.7	3.6	0.8	0.20	0.08	0.04	0.35
9	85.7	5.3	4.2	0.6	0.28	0.18	0.03	0.35
5	86.0	2.4	1.8	0.5	0.11	0.06	0.02	0.22
12	81.9	1.8	1.3	0.3	0.12	0.05	0.02	0.17
11	66.5	1.9	1.6	0.2	0.05	0.02	0.01	0.20
10	73.2	2.5	2.1	0.3	0.06	0.03	0.01	0.23
4	77.5	1.6	1.2	0.3	0.07	0.04	0.01	0.18
2	88.2	2.7	1.9	0.5	0.12	0.06	0.04	0.28
3	91.8	8.3	4.8	1.9	1.1	0.41	0.09	0.62
<b>Media</b>	<b>83.4</b>	<b>4.8</b>	<b>3.8</b>	<b>0.64</b>	<b>0.23</b>	<b>0.10</b>	<b>0.04</b>	<b>0.32</b>
DMS(p≤0.05)	8.4	1.7	1.3	0.5	0.1	0.1	0.02	0.10

La reducción en longitud total de raíces, peso seco de raíces en distintos estratos y cociente raíz/parte aérea fue mayor en los trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos, y triticale, a excepción del trigo intermedio de la revolución-verde 4. La reducción en peso seco de raíces en diferentes estratos fue mayor para las variedades de cebada 13; triticale 15; trigos intermedios de la revolución-verde 6 y trigos antiguos 3 en el estrato de 0-20 cm; cebada 13 y triticale 15 en el estrato 0-20 cm; cebada 13, trigos intermedios de la revolución-verde 8, y trigos antiguos 3 en el estrato de 20-40 cm; cebada 13 y trigos antiguos 3 en el estrato de 40-60 cm; trigos antiguos 3 en el estrato de 60-80 cm; cebada 14, trigos intermedios de la revolución-verde 8, 7 y 9, y trigos antiguos 1 y 3 en el estrato de 80-100 cm. El trigo antiguo 3 exhibió la más alta reducción en el cociente raíz/parte aérea (Cuadro 11).

Los trigos antiguos criollo 'Venturero', Yaqui 50 y Marroquí produjeron mayor peso seco de raíces en los estratos de 0-100 cm que las variedades de cebada (Cleopatra y Lenetah), triticale

(Triticale 118) y las variedades modernas de trigo Tlaxcala F-2000 y Náhuatl F-2000 en condiciones de campo con sequía terminal (Miranda-Domínguez *et al.*, 2016); la presencia de una alta proporción de raíces cerca de la superficie del suelo se ha observado también en otros trabajos de investigación; Gregory *et al.* (1992) determinaron que tanto la variedad de trigo Gutha como las variedades de cebada O'Connor y Beecher, produjeron la mayor proporción de raíces cerca de la superficie del suelo (15 cm) y que el sistema radical de Gutha estuvo confinado a una profundidad menor de 60 cm, mientras que las raíces de O'Connor y Beecher penetraron hasta 80 cm de profundidad, en condiciones de secano con sequía terminal en Australia Occidental.

**Cuadro 11. Diferencia riego-sequía para longitud total de las raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo y cociente raíz/parte aérea (CRPA) para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	LTR (cm)	PSTR (g Pl <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
			0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
16	20.6	2.9	2.4	0.40	0.08	0.07	0.03	0.23
13	16.6	6.9	4.9	1.80	1.00	0.06	0.04	0.45
15	23.3	7.9	7.1	0.45	0.29	0.05	0.04	0.56
14	18.3	2.6	1.8	0.56	0.43	0.15	0.06	0.44
8	13.6	4.6	3.0	1.20	0.33	0.07	0.05	0.46
1	17.5	3.6	2.8	0.50	0.21	0.09	0.07	0.38
6	10.1	5.1	3.6	1.00	0.41	0.08	0.04	0.50
7	15.3	4.5	3.4	0.8	0.23	0.09	0.06	0.52
9	13.1	3.7	2.5	0.62	0.29	0.24	0.05	0.47
5	13.3	2.6	1.7	0.49	0.11	0.05	0.03	0.28
12	16.9	1.2	0.7	0.30	0.13	0.04	0.02	0.17
11	17.1	2.2	1.9	0.24	0.04	0.02	0.003	0.26
10	19.6	2.8	2.5	0.34	0.03	0.03	0.01	0.31
4	7.7	1.3	0.9	0.42	0.06	0.04	0.02	0.16
2	10.4	2.6	1.4	0.90	0.17	0.08	0.07	0.36
3	12.7	5.4	2.8	1.30	0.72	0.59	0.09	0.82
<b>Media</b>	<b>15.4</b>	<b>3.8</b>	<b>2.7</b>	<b>0.70</b>	<b>0.28</b>	<b>0.11</b>	<b>0.04</b>	<b>0.40</b>
DMS(p≤0.05)	15.3	2.9	2.6	0.71	0.67	0.20	0.04	0.20

## 5.5 Evapotranspiración y sus componentes, y eficiencia transpiratoria y eficiencia en el uso de agua

Las deficiencias hídricas del suelo redujeron la evapotranspiración, transpiración y evaporación directa de la superficie del suelo debajo de las plantas en promedio de todos los genotipos de cebada, trigo y triticale. La disminución en la cantidad de agua transpirada en sequía se reflejó en mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria, para producir biomasa aérea (Cuadro 12, Cuadro 4A y 11A).

**Cuadro 12. Evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{spi}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET) en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	$E_T$	T	$E_{spi}$	EUA	ET
	(kg de H <sub>2</sub> O)			(g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)	
Riego	12.5	10.2	2.2	2.1	2.6
Sequía	7.4	6.0	1.4	2.5	3.1
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.5	0.5	0.01	0.1	0.1

En riego cebada mostró mayor evapotranspiración y transpiración que trigo; triticale también tuvo mayor evapotranspiración y transpiración que trigo, y cebada exhibió una evapotranspiración y transpiración similar a triticale. Adicionalmente, cebada mostró mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria que trigo y triticale; y trigo mostró una eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria similar a triticale (Cuadro 13, Cuadro 5A y 12A). La evaporación directa del suelo debajo de la planta en cebada fue similar a la de trigo y triticale (Cuadro 13 y Cuadro 19A).

En sequía triticale mostró mayor evapotranspiración y transpiración que cebada y trigo; y cebada tuvo una evapotranspiración y transpiración similar a trigo. Contrariamente a lo anterior, cebada exhibió mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria que trigo; y triticale mostró mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria que trigo. Asimismo, cebada mostró una eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria similar a triticale (Cuadro 13, Cuadro 5A y 12A). Cebada tuvo una evaporación directa del suelo debajo de la planta similar a trigo y triticale (Cuadro 13 y Cuadro 19A).

En otros estudios de la variación en evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua entre diferentes variedades de cereales bajo condiciones de secano, se determinó que cebada, trigo, triticale y avena tuvieron la misma evapotranspiración; sin embargo, al separar la evapotranspiración en sus componentes transpiración del cultivo y evaporación de la superficie del suelo, se observó que las variedades de cebada tuvieron menos evaporación del suelo lo que resultó en una mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria (López-Castañeda y Richards, 1994b).

**Cuadro 13. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta (E<sub>SPi</sub>), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para trigo, triticale y cebada en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica					
	E <sub>T</sub>	T	E <sub>SPi</sub>	EUA	ET
	(kg de H <sub>2</sub> O)			(g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)	
<b>Riego</b>					
Cebada	15.9	13.6	2.3	2.9	3.4
Trigo	11.3	9.1	2.2	1.9	2.4
Triticale	16.0	13.7	2.3	2.3	2.7
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	2.3	2.3	0.05	0.3	0.4
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	2.3	2.3	0.05	0.3	0.4
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	3.0	3.0	0.07	0.4	0.5
<b>Sequía</b>					
Cebada	7.4	6.1	1.3	3.4	4.2
Trigo	7.2	5.9	1.3	2.2	2.8
Triticale	8.4	7.1	1.3	3.1	3.7
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.8	0.04	0.3	0.5
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.8	0.04	0.3	0.5
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	1.1	1.1	0.05	0.4	0.6

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. triticale.

En riego los trigos antiguos exhibieron mayor evapotranspiración, transpiración y evaporación directa del suelo debajo de la planta que los trigos intermedios de la revolución verde. La evaporación directa del suelo debajo de la planta de los trigos antiguos fue mayor que los trigos modernos (Cuadro 14 y Cuadro 20A). Los trigos antiguos tuvieron una eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria similar a la de los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos (Cuadro 14, Cuadro 6A y 13A).

En sequía contrariamente a lo esperado, los trigos antiguos mostraron una evapotranspiración, transpiración y evaporación directa del suelo debajo de la planta similar a la de los trigos

intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos (Cuadro 14, Cuadro 6A, 13A y 20A). Los trigos antiguos y trigos modernos exhibieron mayor eficiencia en el uso del agua que los trigos intermedios de la revolución-verde. Los trigos antiguos mostraron una eficiencia transpiratoria similar a la de los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos, y los trigos modernos tuvieron mayor eficiencia transpiratoria que los trigos intermedios de la revolución-verde (Cuadro 14, Cuadro 6A y 13A). El uso eficiente del agua o precipitación involucra maximizar la proporción de agua que es utilizada por el cultivo para producir rendimiento de grano, más que permitir que esta se pierda en otras formas; el estrés hídrico severo súbito entre la emergencia de la hoja bandera y la emergencia de la espiga debida, p.e., a vientos cálidos (alta demanda evaporativa), pueden reducir los granos por espiga (algunas veces produciendo la muerte o puntas blancas en la espiga) y el número de macollos viables. Los cultivos con alta biomasa o área foliar grande (con alta evapotranspiración) pueden ser particularmente susceptibles, y la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento de grano pueden ser bajos (Morgan, 2003).

**Cuadro 14. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta (E<sub>SP1</sub>), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para los trigos antiguos, intermedios de la revolución-verde y modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica					
	E <sub>T</sub>	T (kg de H <sub>2</sub> O)	E <sub>SP1</sub>	EUA (g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)	ET
<b>Riego</b>					
Trigos antiguos	13.2	10.9	2.3	1.9	2.4
Trigos intermedios de la revolución-verde	9.7	7.6	2.1	1.9	2.4
Trigos modernos	11.2	9.0	2.2	2.0	2.5
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	2.5	2.5	0.06	0.3	0.4
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	2.1	2.1	0.05	0.3	0.4
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	2.1	2.1	0.05	0.3	0.4
<b>Sequía</b>					
Trigos antiguos	7.6	6.3	1.3	2.3	2.8
Trigos intermedios de la revolución-verde	7.4	6.0	1.3	2.0	2.4
Trigos modernos	6.9	5.6	1.3	2.3	2.9
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.9	0.9	0.04	0.3	0.5
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.8	0.04	0.3	0.4
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.8	0.8	0.04	0.3	0.4

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

Las variedades de triticale 16 y 15; cebada 13; y trigo 3, mostraron mayor evapotranspiración que las otras variedades de cebada y trigo; la variedad de cebada 13; triticale 15; y trigo 3 exhibieron mayor transpiración que las demás variedades de cebada, triticale y trigo (Cuadro 15, Cuadro 9A y 16A). Las variedades de trigo 5, 11 y 4 tuvieron menor evaporación directa del suelo debajo de la planta que las otras variedades de cebada, triticale y trigo en promedio de riego y sequía (Cuadro 15 y Cuadro 23A). La variedad 14 de cebada mostró mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria que las otras variedades de cebada, trigo y triticale (Cuadro 15).

**Cuadro 15. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta (E<sub>SP1</sub>), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipos	E <sub>T</sub>	T	E <sub>SP1</sub>	EUA	ET
	(kg de H <sub>2</sub> O)			(g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)	
16	11.4	9.6	1.9	2.6	3.1
13	12.8	11.0	1.9	2.8	3.3
15	13.0	11.2	1.8	2.8	3.2
14	10.5	8.7	1.9	3.5	4.3
8	11.3	9.5	1.8	2.5	3.0
1	10.3	8.5	1.9	2.3	2.7
6	10.4	8.6	1.8	2.4	2.8
7	10.1	8.3	1.8	2.4	2.9
9	11.1	9.2	1.8	2.4	2.9
5	8.1	6.4	1.7	1.9	2.4
12	7.7	5.9	1.8	1.7	2.2
11	6.1	4.5	1.7	1.8	2.6
10	8.0	6.2	1.8	1.8	2.3
4	7.0	5.3	1.7	1.6	2.1
2	8.0	6.2	1.8	1.8	2.3
3	12.9	11.0	1.9	2.3	2.7
<b>Media</b>	<b>9.9</b>	<b>8.1</b>	<b>1.8</b>	<b>2.3</b>	<b>2.8</b>
DMS (p≤0.05)	1.6	1.5	0.06	0.3	0.4

La reducción en evapotranspiración, transpiración y evaporación directa del suelo debajo de la planta, debido al déficit hídrico del suelo fue mayor en los genotipos de cebada 13 y 14; triticale 15 y 16; y trigos intermedios de la revolución-verde 8 y trigos antiguos 3 (Cuadro 16, Cuadro 10A, y 17A y 24A). La mayor reducción en la eficiencia en el uso del agua se observó en cebada 13; triticale 15; y trigo antiguo 3. La sequía redujo la eficiencia transpiratoria en mayor grado en cebada 13, triticale 15, y trigos intermedios de la revolución-verde 8 y trigos antiguos 3 (Cuadro 16).

La adquisición de más agua por las plantas está ligada a una mayor profundidad del sistema radical o mayor densidad de raíces en el perfil del suelo; estos atributos de la planta están relacionados con la conservación del agua (cierre estomático rápido o cierre lento o retrasado de los estomas), ajuste del acceso al agua (lento desarrollo del área foliar, incremento de la profundidad de las raíces e incremento de la tasa de elongación de las raíces) y ajuste de las sensibilidades especiales (disminución en la conductancia hidráulica de las raíces). Estas

estrategias de conservación y utilización del agua en la planta pueden ayudar a que la planta reduzca la severidad del estrés hídrico al ahorrar agua para utilizarla durante condiciones de sequía terminal, y tener acceso a la humedad almacenada en el subsuelo (Sadok y Sinclair, 2011).

**Cuadro 16. Diferencia riego - sequía en la evapotranspiración ( $E_T$ ), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ), eficiencia en uso de agua (EUA) y eficiencia transpiratoria (ET), para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

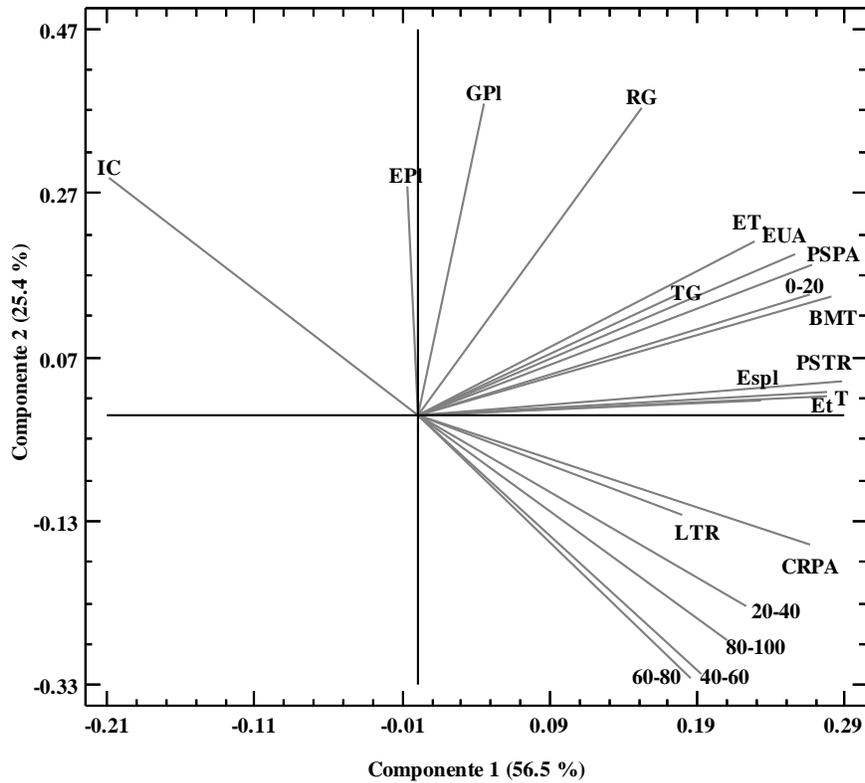
Genotipos	$E_T$	T	$E_{SPI}$	EUA	ET
	(kg de H <sub>2</sub> O)			(g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)	
16	7.4	6.4	0.89	0.35	0.50
13	9.5	8.5	0.88	0.90	1.0
15	8.0	7.0	0.89	1.28	1.50
14	7.5	6.5	0.90	0.45	0.65
8	7.5	6.5	0.88	0.65	0.85
1	4.7	3.7	0.89	0.30	0.28
6	5.0	4.1	0.81	0.38	0.40
7	6.3	5.4	0.85	0.60	0.82
9	6.9	5.9	0.89	0.25	0.33
5	1.9	1.5	0.74	0.13	0.38
12	2.6	1.7	0.84	0.23	0.23
11	0.9	0.7	0.58	0.38	0.50
10	1.6	1.2	0.90	0.35	0.18
4	0.4	0.6	0.59	0.33	0.40
2	2.0	1.5	0.85	0.23	0.28
3	10.0	8.9	1.0	0.98	1.27
<b>Media</b>	<b>5.1</b>	<b>4.4</b>	<b>0.83</b>	<b>0.48</b>	<b>0.60</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	3.1	3.1	0.06	0.49	0.65

### 5.6 Análisis de componentes principales

La variación observada en el experimento bajo condiciones de invernadero se asocia a dos componentes principales (CP) que explican el 81.9 % de la variabilidad conjunta entre los niveles de humedad edáfica y los genotipos estudiados (Figura 4). El CP1 explicó el 56.5 % de la variación y mostró una correlación positiva con PSTR ( $r=0.27$ ), CRPA ( $r=0.26$ ),  $E_T$  ( $r=0.28$ ), T ( $r=0.28$ ), BMT ( $r=0.28$ ), PSPA ( $r=0.27$ ), peso seco de raíces en el estrato de 0-20 cm ( $r=0.27$ ), EUA ( $r=0.26$ ), ET ( $r=0.23$ ),  $E_{SPI}$  ( $r=0.23$ ), peso seco de raíces en el estratos de 20-40 cm ( $r=0.22$ ), peso seco de raíces en el estrato de 40-60 cm ( $r=0.22$ ), peso seco de raíces en el estrato

de 80-100 cm ( $r=0.21$ ), en el estrato de 60-80 cm ( $r=0.19$ ), LTR ( $r=0.18$ ), TG ( $r=0.18$ ) y RG ( $r=0.15$ ); y negativa con el índice de cosecha ( $r=-0.21$ ); el IC mostró relación negativa con las características del sistema radical, sobre todo con el peso seco de raíces en el estrato de 80-100 cm (Figura 4). Por otro lado, el CP2 contribuyó con el 25.4 % de la variación de los datos y presentó una asociación positiva con el RG ( $r=0.37$ ), G PI<sup>-1</sup> ( $r=0.38$ ), IC ( $r=0.29$ ), E PI<sup>-1</sup> ( $r=0.28$ ), ET ( $r=0.22$ ), EUA ( $r=0.19$ ), PSPA ( $r=0.18$ ), peso seco de raíces en el estrato de 0-20 cm ( $r=0.15$ ) y BMT ( $r=0.14$ ) y se relacionó negativamente con el peso seco de raíces en los estratos de 20-40 cm ( $r=-0.23$ ), 40-60 cm ( $r=-0.32$ ), 60-80 cm ( $r=-0.32$ ) y 80-100 cm ( $r=-0.27$ ) de profundidad del suelo (Figura 4).

La relación positiva entre el rendimiento y sus componentes, las características del sistema radical, eficiencia en uso de agua y eficiencia transpiratoria es un indicativo de que dichos atributos tienen potencial, para utilizarse en la selección de germoplasma en pre o post-antesis y contribuir al rendimiento final de los cultivos bajo sequía terminal (Mwadzingeni *et al.* 2016). En cebada se determinó una asociación positiva y significativa del RG con PSPA y el número granos m<sup>-2</sup>, es decir, que los genotipos con mayor rendimiento de grano tuvieron mayor biomasa aérea y mayor número de granos m<sup>-2</sup> (López-Castañeda, 2011). En otros trabajos de investigación se ha mostrado una correlación positiva entre el rendimiento de grano y la longitud total de raíces, asimismo, la LTR y biomasa de la raíz se correlacionan positivamente con la evapotranspiración (Abdolshahi *et al.*, 2015), lo cual indica que los atributos de la raíz pueden ser útiles en ambientes con baja disponibilidad de humedad, para lograr una mayor absorción de agua. Siahpoosh y Dehghanian (2012) señalan que el rendimiento de grano está asociado positivamente con la eficiencia transpiratoria y eficiencia en uso de agua; y que este atributo agronómico se puede mejorar a través del índice de cosecha y eficiencia transpiratoria en condiciones de estrés hídrico.



**Figura 4. Plano biplot del rendimiento de grano (RG) versus componentes del rendimiento, arquitectura del sistema radical, evapotranspiración y sus componentes, y eficiencia en el uso del agua para 14 genotipos de trigo, dos de triticale y dos de cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. IC=Índice de cosecha; BMT=biomasa total; PSPA=peso seco de la parte aérea; EPI=espigas por planta; GPI=granos por planta; TG=tamaño del grano; LTR=longitud total de raíces; PSTR=peso seco total de raíces; peso seco de raíz en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm; CRPA=cociente raíz/parte aérea; ET=evapotranspiración; T=transpiración; Espl=evaporación directa del suelo debajo de la planta; ET=eficiencia transpiratoria; EUA=eficiencia en uso de agua.**

## VI. CONCLUSIÓN

El sistema radical de todas las plantas acumuló mayor cantidad de peso seco en sequía que en riego. Los trigos antiguos produjeron mayor peso seco de raíces que los trigos intermedios de la revolución-verde y los trigos modernos en los estratos de 40 cm a 1 m. El déficit hídrico del suelo disminuyó el rendimiento de grano y sus componentes; los componentes del rendimiento más afectados por la sequía fueron el peso seco de la parte aérea, número de granos y espigas planta<sup>-1</sup>, biomasa total, tamaño del grano e índice de cosecha. Las deficiencias hídricas del suelo también redujeron la evapotranspiración, transpiración y evaporación del suelo debajo de la planta; la menor transpiración en sequía se reflejó en mayor eficiencia en el uso del agua y eficiencia transpiratoria.

## VII. LITERATURA CITADA

- Abdolshahi, R., M. Nazari, A. Safarian, T. S. Sadathossini, M. Salarpour and H. Amiri. 2015. Integrated selection criteria for drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) breeding programs using discriminant analysis. *Field Crops Research* 174:20-29. doi:10.1016/j.fcr.2015.01.009.
- Blum, A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* 112:119-123. doi: 10.1016/j.fcr.2009.03.009.
- Briggs, L.J. and Shantz, H.L. 1913. The water requirement of plants. *In: Bureau of plant industry bulletin No. 284* (Washington, DC: US Department of Agriculture):7-12.
- Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J. and Farquhar, G.D. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Experimental Botany*, 55: 2447–2460. doi:10.1093/jxb/erh277
- Dettori, M., C. Cesaraccio, P. Duce and V. Mereu. 2022. Performance prediction of durum wheat genotypes in response to drought and heat in climate change conditions. *Genes* 13(488): 1-25. doi:10.3390/genes13030488.
- El Hassouni, K., S. Alahmad, B. Belkadi, A. Filali-Maltouf, L.T. Hickey and F.M. Bassi. 2018. Root system architecture and its association with yield under different water regimes in durum wheat. *Crop Science* 58(6):2331-2346. doi:10.2135/cropsci2018.01.0076.
- Ehdaie, B., G.A. Alloush and J. G. Waines. 2008. Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat. *Field Crops Research* 106: 34–43. doi:10.1016/j.fcr.2007.10.012
- 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. doi:10.1007/s10681-011-0585-9
- Fang, Y., Y. Du, J. Wang, A. Wu, S. Qiao, B. Xu, S. Zhang, K.H.M. Siddique and Y. Chen. 2017. Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of winter wheat. *Frontiers in Plant Science* 8:672. doi:10.3389/fpls.2017.00672.
- Fischer, R.A. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural research* 29:897-912.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie libros, No. 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F., México. 90 p.
- 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.
- Hammer, G., Chapman, S., Van Oosterom, E and Podlich, D. 2005. Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 56:947–960.

- Hurd, E.A. 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agricultural Meteorology* 14, 39–55. doi:10.1016/0002-1571(74)90009-0
- 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
- Kirkegaard, J.A. and J.M. Lilley. 2007. Root penetration rate—a benchmark to identify soil and plant limitations to rooting depth in wheat. *Animal Production Science* 47:590–602.
- Lemma, A.Z., F.M. Hailemariam, K.A. Abebe and Z. Bishaw. 2021. Evaluation of durum wheat (*Triticum turgidum* var *durum*) genotypes for drought tolerance using morpho-agronomic traits. *Journal of Plant Breeding and Crop science* 13(4): 216-225.
- Liang, X., J.E. Erickson, W. Vermerris, D.L. Rowland, L.E. Sollenberger and M.L. Silveira. 2017. Root architecture of sorghum genotypes differing in root angles under different water regimes. *Journal of Crop Improvement* 31(1):39-55.
- Liao, M., I.R. Fillery and J.A. Palta. 2004. Early vigorous growth is a major factor influencing nitrogen uptake in wheat. *Functional Plant Biology* 31:121-129.
- Lilley, J.M. and J.A. Kirkegaard. 2011. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. *Field Crops Research* 122:118–130.
- López-Castañeda, C. 1993. Eficiencia en el uso del agua y discriminación de carbono. *Agrociencia* 4(4):7-32.
- 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. doi:10.1016/0378-4290(94)90081-7
- López-Castañeda, C. and R.A. Richards. 1994b. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III: Water use and water use efficiency. *Field Crops Research* 39:85-98. doi: 10.1016/0378-4290(94)90011-6
- López-Castañeda, C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de grano 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*: Cruz-Izquierdo S.; Ayala-Garay O.J.; Cruz-Huerta N.; Ramírez-Ramírez I.; Martínez-Villegas E. (eds.). 2013. Avances de Investigación 2012. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad - Genética. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad–Genética. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Pp: 35-38.
- López-Castañeda, C. y R.A. Richards. 2001. ¿Contribuyen la tasa de crecimiento del grano y removilización de reservas del tallo al rendimiento de grano durante la sequía? *Memorias del IV Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, B.C. Octubre 25-26, pp: 61-66.*

- Lukaszewski, A.J. 2000. Manipulation of the 1RS.1BL translocation in wheat by induced homoeologous recombination. *Crop Science* 40(1):216–225. doi:10.2135/cropsci2000.401216x
- Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology* 109:7–13. doi:10.1104/pp.109.1.7
- Manschadi, A.M., J. Christopher, P. de Voil, G.L. Hammer. 2006. The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Funct. Plant Biol.* 33:823–837. doi:10.1071/fp06055
- Manschadi, A.M., G.L. Hammer, J.T. Christopher and P. de Voil. 2008. Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil* 303:115-129.
- Manske, G.G.B. and Vlek, P.L.G. 2002. Root architecture — wheat as a model plant. *In*: ‘Plant roots: the hidden half’. (Eds Y Waisel, A. Eshel, U Kafkafi) pp. 249–259. (Marcel Dekker Inc.: New York).
- Miranda-Domínguez, L. E., C. López-Castañeda, I. Benítez-Riquelme y J. A. Mejía-Contreras. 2016. Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 393-407.
- Morgan, J.M. 2003. Making the most of available water in wheat production. *Agnote* (Bill Boad, ed.). The State of New South Wales, NSW Agriculture. Information Delivery Program, Dubbo, July 2003, Agdex 112/10 Job No. 4287. Pp:1-3.
- Mwadzingeni, L., H. Shimelis, S. Tesfay and T. J Tsilo. 2016. Screening of bread wheat genotypes for drought tolerance using phenotypic and proline analyses. *Front. Plant Sci.* 7:1276. doi:10.3389/fpls.2016.01276
- O’Brien L. 1979. Genetic variability of root growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Australian Journal of Agricultural Research* 30, 587–595. doi:10.1071/AR9790587
- Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *The journal of the Australian Institute of Agricultural Science- September/December, 1977(3-4):117-120.*
- Passioura, J.B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce — from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80:176–196.
- Porter, J.R. and M. Gawith. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10(1):23–36. doi:10.1016/S1161-0301(98)00047-1
- Poudel, P.B and M.R. Poudel. 2020. Heat stress effects and tolerance in wheat: a review. *Journal of Biology and Today's World* 9(3):217.
- Ramalingam P., A. Kamoshita, V. Deshmukh, S. Yaginuma and Y. Uga. 2017. Association between root growth angle and root length density of a near-isogenic line of IR64 rice

- with deeper rooting 1 under different levels of soil compaction. *Plant Production Science* 20(2):162-175.
- Richards, R.A. 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management* 80:197-211. doi:10.1016/j.agwat.2005.07.013
- Richards, R.A. and J.B. Passioura. 1989. A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots of wheat and its effect on grain yield in rain-fed environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 40:943–950. doi:10.1071/ar9890943.
- Richards, R.A., G.J. Rebetzke, M. Watt, A.G. Condon, W. Spielmeyer, and R. Dolferus. 2010. Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology* 37, 85–97.
- Romero-Félix, C.S., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, C.G. Martínez-Rueda, S. Miranda-Colín, V.H. Aguilar-Rincón. 2021. Variabilidad en características morfo-fisiológicas del frijol común bajo sequía terminal. *Agrociencia* 55:471-485.
- SADER (SIAP). 2022. Estadísticas anuales de producción agrícola. (<http://www.agricultura.gob.mx/datos-abiertos/siap>, Consultado abril, 2022).
- SAS (Statistical Analysis System), OnDemand for Academics. 2021. SAS® Studio. SAS 9.4. Institute Inc., Campus Drive, Cary, North Carolina 27513, USA. <https://welcome.oda.sas.com/home>
- Sadok, W. and T.R. Sinclair. 2011. Crops yield increase under water-limited conditions: Review of recent physiological advances for soybean genetic improvement. *Advances in Agronomy* 113: 324-349. DOI: 10.1016/B978-0-12-386473-4.00007-5.
- Sanguineti, M., S. Li, M. Maccaferri, S. Corneti, F. Rotondo, T. Chiari, and R. Tuberosa. 2007. Genetic dissection of seminal root architecture in elite durum wheat germplasm. *Ann. Appl. Biol.* 151:291–305. doi:10.1111/j.1744-7348.2007.00198.x
- Siahpoosh, M.R. and E. Dehghanian. 2012. Water use efficiency, transpiration efficiency, and uptake efficiency of wheat during drought. *Agronomy Journal* 104:1238–1243. doi:10.2134/agronj2011.0320
- Siddique, K.H.M., D. Tennant, M.W. Perry and R.K. Belford. 1990. Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 41(3):431 - 447. doi:10.1071/AR9900431
- Sinclair, T.R. 2018. Effective water use required for improving crop growth rather than transpiration efficiency. *Front. Plant Sci.* 9:1442. doi:10.3389/fpls.2018.01442.
- Statgraphics, 2021. Centurion XIX. Versión 19.3.03. Statpoint Technologies, Inc. <https://www.statgraphics.com>

- Tiwari, A., D.K. Mishra and R.S. Shukla. 2017. Genetic analysis of yield components and physiological characters under changing climate in wheat. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6(9):3525-3530. doi:10.20546/ijcmas.2017.609.433
- Tfwala, C.M., A.G. Mengistu, I.B.U. Haka, L.D. Rensburg and C.C.D. Preez. 2021. Seasonal variations of transpiration efficiency coefficient of irrigated wheat. *Heliyon* 7(2): e06233 doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06233
- Villalobos-González, A., C. López-Castañeda, S. Miranda-Colín, V.H. Aguilar-Rincón y M.B. López-Hernández. 2018. Efecto del estrés hídrico y nitrógeno en las raíces de variedades híbridas y criollas de maíz (*Zea mays* L.). *Agroproductividad* 11(1): 3-8.
- Waines, J.G. and B. Ehdaie. 2007. Domestication and crop physiology: roots of green-revolution wheat. *Annals of botany* 100(5):991–998. doi:10.1093/aob/mcm180
- Wasson, A.P., R.A. Richards, R. Chatrath, S.C. Misra, S.V.S. Prasad, G.J. Rebetzke, J.A. Kirkegaard, J. Christopher and M. Watt. 2012. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany* 63:3485–3498.
- Wasson, A.P., G.J. Rebetzke, J.A. Kirkegaard, J. Christopher, R.A. Richards and M. Watt. 2014. Soil coring at multiple field environments can directly quantify variation in deep root traits to select wheat genotypes for breeding. *Journal of Experimental Botany* 65:6231-6249.
- Watt, M., S. Moovi, S.C. Cunningham, J.A. Kirkegaard, G.J. Rebetzke and R.A. Richards. 2013. A rapid, controlled-environment seedling root screen for wheat correlates well with rooting depths at vegetative, but not reproductive, stages at two field sites. *Annals of Botany* 112:447-455.
- White, R.G. and J.A. Kirkegaard. 2010. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil – implications for water uptake. *Plant, Cell and Environment* 33:133-148.

## ANEXOS

**Cuadro 1A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para el rendimiento de grano (RG), índice de cosecha (IC), biomasa total (BMT), peso seco de la parte aérea (PSPA), espigas por planta (E PI-1), granos planta (G PI-1) y tamaño del grano (TG). Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

FV	GL	RG (g PI <sup>-1</sup> )	IC	BMT (g PI <sup>-1</sup> )	PSPA (g PI <sup>-1</sup> )	E PI <sup>-1</sup>	G PI <sup>-1</sup>	TG (mg)
<b>Riego</b>								
R	3	10.0ns	0.006ns	20.2ns	9.8ns	3.9ns	8339.4ns	2.4ns
B	15	50.8*	0.02*	526.8*	361.6*	12.06*	25082.2*	155.7*
Error	45	4.2	0.001	39.5	27.1	3.9	2787.0	4.3
<b>Media</b>		<b>7.5</b>	<b>0.32</b>	<b>26.8</b>	<b>23.8</b>	<b>7.1</b>	<b>218.5</b>	<b>33.8</b>
CV (%)		27	10	23	22	28	24	6
<b>Sequía</b>								
R	3	0.9ns	0.005ns	5.0ns	0.6ns	0.8ns	324.5ns	10.7ns
B	15	4.9*	0.03*	133.1*	33.8*	6.3*	8115.0*	159.4*
Error	45	0.5	0.001	8.7	2.9	0.7	810.7	4.5
<b>Media</b>		<b>3.3</b>	<b>0.27</b>	<b>18.7</b>	<b>12.2</b>	<b>4.8</b>	<b>128.1</b>	<b>26.3</b>
CV (%)		22	14	16	14	17	22	8
<b>Análisis combinado (Riego- Sequía)</b>								
R	3	5.9ns	0.005*	3.5ns	4.0ns	1.8ns	4780.2ns	1.9ns
A	1	585.9*	0.082*	2142.4*	4291.0*	175.8*	261635.7*	1719.9*
B	15	35.7*	0.042*	570.1*	294.5*	11.3*	21832.8*	297.2*
A*B	15	20.0*	0.006*	89.7*	100.8*	7.1*	11364.3*	17.9*
Error	93	2.5	0.001	24.0	14.7	2.3	1866.1	4.6
<b>Media</b>		<b>5.4</b>	<b>0.30</b>	<b>22.7</b>	<b>18.0</b>	<b>5.9</b>	<b>173.3</b>	<b>30.1</b>
CV (%)		29	13	21	21	26	25	7

R=Repeticiones o bloques; A=Niveles de humedad edáfica (riego y sequía); B=Genotipos; A\*B=interacción niveles de humedad por genotipos; CV=Coefficiente de variación; \*(p≤0.05); ns=No significativo.

**Cuadro 2A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para la longitud total de raíces (LTR), peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de raíces en los estratos 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm, y cociente raíces/parte aérea (CRPA). Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

FV	GL	LTR (cm)	PSTR (g PI <sup>-1</sup> )	Peso seco de raíz (g)					CRPA
				0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	
<b>Análisis individual</b>									
<b>Riego</b>									
R	3	315.6*	4.8ns	3.17ns	0.32ns	0.0005ns	0.0004ns	0.0002ns	0.005ns
B	15	202.6*	19.7*	15.1*	0.57*	0.11*	0.003*	0.0004*	0.009*
Error	45	96.2	2.2	1.2	0.32	0.005	0.0003	0.0001	0.001
<b>Media</b>		<b>75.8</b>	<b>3.1</b>	<b>2.6</b>	<b>0.36</b>	<b>0.12</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	<b>0.12</b>
CV (%)		13	48	43	158	56	46	89	29
<b>Sequía</b>									
R	3	39.5ns	2.4ns	2.0ns	0.04ns	0.002ns	0.003ns	0.0004ns	0.009ns
B	15	158.8*	40.7*	28.3*	1.16*	0.43*	0.10*	0.004*	0.16*
Error	45	33.7	3.4	2.2	0.15	0.03	0.02	0.0006	0.02
<b>Media</b>		<b>90.9</b>	<b>6.5</b>	<b>5.0</b>	<b>0.92</b>	<b>0.34</b>	<b>0.15</b>	<b>0.05</b>	<b>0.52</b>
CV (%)		6	28	29	42	53	100	46	27
<b>Análisis combinado (Riego-Sequía)</b>									
R	3	68.4ns	0.9ns	0.8ns	0.2ns	0.0009ns	0.002ns	0.0003ns	0.006ns
A	1	7303.9*	370.3*	194.8*	10.1*	1.4*	0.37*	0.026*	5.08*
B	15	327.7*	53.0*	37.5*	1.5*	0.47*	0.06*	0.003*	0.11*
A*B	15	33.7ns	7.3*	5.9*	0.3ns	0.06*	0.04*	0.001*	0.06*
Error	93	72.1	2.9	1.8	0.25	0.02	0.01	0.0004	0.010
<b>Media</b>		<b>83.3</b>	<b>4.8</b>	<b>3.8</b>	<b>0.64</b>	<b>0.23</b>	<b>0.10</b>	<b>0.04</b>	<b>0.32</b>
CV (%)		10	36	35	75	58	110	50	31

R=Repeticiones o bloques; A=Niveles de humedad edáfica (riego y sequía); B=Genotipos; A\*B=interacción niveles de humedad por genotipos; CV=Coficiente de variación; \*=p<0.05; ns=No significativo.

**Cuadro 3A. Fuentes de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios para evapotranspiración (E<sub>T</sub>), transpiración (T), evaporación directa del suelo debajo de la planta (E<sub>SPI</sub>), eficiencia transpiratoria (ET) y eficiencia en uso de agua (EUA). Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

FV	GL	E <sub>T</sub>	Componentes de E <sub>T</sub> (kg de H <sub>2</sub> O)		ET	EUA
			T	E <sub>SPI</sub>	(g de MS/ kg de H <sub>2</sub> O)	(g de MS/kg de H <sub>2</sub> O)
<b>Riego</b>						
R	3	5.1ns	5.3ns	0.004ns	0.2ns	0.1ns
B	15	56.9*	53.8*	0.07*	0.8*	0.8*
Error	45	4.3	4.3	0.002	0.1	0.08
<b>Media</b>		<b>12.5</b>	<b>10.2</b>	<b>2.2</b>	<b>2.6</b>	<b>2.1</b>
CV (%)		17	20	2	14	13
<b>Sequía</b>						
R	3	0.2ns	0.3ns	0.0003ns	0.1ns	0.05ns
B	15	2.3*	2.3*	0.001*	2.0*	1.5*
Error	45	0.6	0.6	0.0001	0.2	0.1
<b>Media</b>		<b>7.4</b>	<b>6.0</b>	<b>1.4</b>	<b>3.0</b>	<b>2.5</b>
CV (%)		11	13	1	13	12
<b>Análisis combinado (Riego-Sequía)</b>						
R	3	2.3ns	2.3ns	0.003ns	0.1ns	0.09ns
A	1	831.6*	566.1*	22.5*	6.6*	5.5*
B	15	38.3*	36.6*	0.04*	2.3*	2.0*
A*B	15	20.9*	19.5*	0.02*	0.5*	0.2*
Error	93	2.5	2.5	0.0009	0.1	0.09
<b>Media</b>		<b>9.9</b>	<b>8.1</b>	<b>1.8</b>	<b>2.8</b>	<b>2.3</b>
CV (%)		16	19	2	14	13

R=Repeticiones o bloques; A=Niveles de humedad edáfica (riego y sequía); B=Genotipos; A\*B=interacción niveles de humedad por genotipos; CV=Coefficiente de variación; \*=p≤0.05; ns=No significativo.

**Cuadro 4A. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>) acumulada por planta durante el experimento en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
Riego	0.79	1.8	3.4	5.5	7.1	8.6	10.1	11.5	12.3	12.5	12.5
Sequía	0.89	2.0	3.6	5.5	6.5	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
<b>Media</b>	<b>0.84</b>	<b>1.9</b>	<b>3.5</b>	<b>5.5</b>	<b>6.8</b>	<b>7.9</b>	<b>8.7</b>	<b>9.4</b>	<b>9.8</b>	<b>9.9</b>	<b>9.9</b>
DMS (p≤0.05)	0.04	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

**Cuadro 5A. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>) acumulada por planta durante el experimento para trigo, triticale y cebada en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Cebada	0.75	2.0	4.2	6.9	8.9	11.2	13.1	14.7	15.6	15.9	15.9
Trigo	0.80	1.7	3.2	5.1	6.6	7.9	9.2	10.5	11.1	11.3	11.3
Triticale	0.78	1.8	3.9	6.4	8.2	10.2	12.3	14.5	15.8	16.0	16.0
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.2	2.2
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.2	2.2
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.18	0.5	0.8	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	2.9	2.9
<b>Sequía</b>											
Cebada	0.90	2.1	3.6	5.5	6.5	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
Trigo	0.87	1.9	3.4	5.3	6.2	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
Triticale	0.96	2.4	4.5	6.7	7.8	8.3	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.5	0.9	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. triticale.

**Cuadro 6A. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>) total por planta para trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Trigos antiguos	0.77	1.7	3.3	5.5	7.0	8.6	10.1	11.7	12.8	13.1	13.2
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.84	1.8	3.3	5.1	6.3	7.4	8.4	9.3	9.6	9.6	9.6
Trigos modernos	0.79	1.7	3.2	5.0	6.5	7.8	9.1	10.4	11.1	11.2	11.2
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.15	0.4	0.6	1.1	1.3	1.6	1.9	2.2	2.4	2.4	2.4
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.13	0.3	0.5	0.9	1.1	1.4	1.7	1.9	2.1	2.1	2.1
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.13	0.3	0.5	0.9	1.1	1.4	1.7	1.9	2.1	2.1	2.1
<b>Sequía</b>											
Trigo antiguos	0.90	1.9	3.7	5.7	6.6	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.91	1.9	3.6	5.4	6.4	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
Trigos modernos	0.84	1.8	3.2	5.0	5.9	6.8	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.10	0.3	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.10	0.3	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos;

<sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

**Cuadro 7A. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio riego. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.77	1.8	3.9	6.2	7.9	9.7	11.6	13.6	14.8	15.1	15.1
13	0.76	2.2	4.8	8.2	10.6	13.2	15.0	16.5	17.3	17.5	17.5
15	0.78	1.9	4.0	6.6	8.5	10.7	13.0	15.4	16.7	16.9	16.9
14	0.73	1.8	3.6	5.6	7.3	9.2	11.2	12.9	13.9	14.2	14.3
8	0.82	1.8	3.6	5.9	7.9	9.7	11.7	13.7	14.9	15.1	15.1
1	0.80	2.0	3.9	6.3	7.9	9.3	10.7	11.9	12.5	12.7	12.7
6	0.90	2.1	3.8	5.9	7.5	8.9	10.4	12.1	12.9	12.9	12.9
7	0.79	1.7	3.3	5.4	6.9	8.5	10.2	12.3	13.2	13.3	13.3
9	0.77	1.8	3.5	5.7	7.7	9.5	11.3	13.4	14.3	14.5	14.5
5	0.82	1.8	3.2	4.9	6.2	7.3	8.2	8.9	9.0	9.1	9.1
12	0.76	1.6	2.9	4.5	5.7	6.8	7.7	8.5	8.9	8.9	8.9
11	0.83	1.6	2.8	3.9	4.9	5.6	6.1	6.4	6.4	6.4	6.4
10	0.77	1.7	2.9	4.5	5.6	6.6	7.5	8.2	8.7	8.8	8.8
4	0.80	1.7	3.0	4.4	5.2	6.0	6.6	6.9	6.9	6.9	6.9
2	0.74	1.5	2.7	4.4	5.5	6.5	7.4	8.3	8.9	9.0	9.0
3	0.77	1.6	3.4	5.7	7.6	9.8	12.3	14.9	16.9	17.7	17.9
<b>Media</b>	<b>0.79</b>	<b>1.8</b>	<b>3.4</b>	<b>5.5</b>	<b>7.1</b>	<b>8.6</b>	<b>10.1</b>	<b>11.5</b>	<b>12.3</b>	<b>12.5</b>	<b>12.5</b>
DMS (p≤0.05)	0.18	0.5	0.8	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	2.9	2.9

**Cuadro 8A. Evapotranspiración (E<sub>T</sub>) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, cebada y triticale en promedio de sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.87	2.1	3.9	6.0	7.1	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
13	0.85	2.2	4.1	6.2	7.2	8.0	8.1	8.1	8.0	8.0	8.1
15	1.04	2.7	5.0	7.4	8.4	8.9	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
14	0.96	1.9	3.1	4.7	5.7	6.7	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
8	0.81	1.9	3.6	5.7	6.7	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
1	0.90	2.0	3.9	6.1	7.1	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
6	0.94	2.2	4.0	5.9	7.0	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
7	0.84	1.7	3.1	5.0	5.9	6.8	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
9	0.90	2.0	3.7	5.7	6.7	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
5	0.96	1.9	3.6	5.4	6.4	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
12	0.79	1.6	2.9	4.5	5.4	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
11	0.82	1.5	2.5	4.0	4.8	5.7	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
10	0.88	1.9	3.5	5.3	6.2	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
4	0.82	1.9	3.3	4.9	5.7	6.7	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
2	0.88	1.9	3.3	4.8	5.7	6.7	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
3	0.92	1.9	3.8	6.0	7.1	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
<b>Media</b>	<b>0.89</b>	<b>2.0</b>	<b>3.6</b>	<b>5.5</b>	<b>6.5</b>	<b>7.3</b>	<b>7.4</b>	<b>7.4</b>	<b>7.4</b>	<b>7.4</b>	<b>7.4</b>
DMS (p≤0.05)	0.14	0.5	0.9	1.2	1.3	1.7	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

**Cuadro 9A. Evapotranspiración (ET) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.82	1.9	3.9	6.1	7.5	8.7	9.7	10.7	11.3	11.4	11.4
13	0.81	2.2	4.5	7.2	8.9	10.6	11.6	12.3	12.7	12.8	12.8
15	0.91	2.3	4.5	7.0	8.5	9.8	11.0	12.2	13.0	13.0	13.0
14	0.84	1.9	3.3	5.2	6.5	7.9	9.0	9.9	10.4	10.5	10.5
8	0.81	1.9	3.6	5.8	7.3	8.6	9.6	10.7	11.2	11.3	11.3
1	0.85	2.0	3.9	6.2	7.5	8.6	9.3	9.9	10.2	10.3	10.3
6	0.92	2.1	3.9	5.9	7.2	8.4	9.1	9.9	10.4	10.4	10.4
7	0.82	1.7	3.2	5.2	6.5	7.7	8.6	9.6	10.1	10.1	10.1
9	0.83	1.9	3.6	5.7	7.2	8.5	9.5	10.5	10.9	11.1	11.1
5	0.89	1.8	3.9	5.2	6.3	7.2	7.7	8.0	8.1	8.1	8.1
12	0.77	1.6	2.9	4.5	5.5	6.5	7.0	7.4	7.6	7.7	7.7
11	0.83	1.5	2.7	4.0	4.9	5.7	6.0	6.1	6.1	6.1	6.1
10	0.83	1.8	3.2	4.9	5.9	6.9	7.3	7.7	7.9	8.0	8.0
4	0.81	1.8	3.1	4.6	5.5	6.4	6.7	6.9	6.9	6.9	6.9
2	0.81	1.7	3.0	4.6	5.6	6.6	7.2	7.6	7.9	8.0	8.0
3	0.85	1.8	3.6	5.9	7.4	8.9	10.1	11.4	12.4	12.8	12.9
<b>Media</b>	<b>0.84</b>	<b>1.9</b>	<b>3.5</b>	<b>5.5</b>	<b>6.8</b>	<b>7.9</b>	<b>8.7</b>	<b>9.4</b>	<b>9.8</b>	<b>9.9</b>	<b>9.9</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.12	0.3	0.6	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6

**Cuadro 10A. Diferencia entre riego - sequía de la evapotranspiración (ET) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.10	0.37	0.7	1.3	1.7	2.4	3.9	5.9	7.1	7.4	7.4
13	0.09	0.71	1.3	2.8	3.6	5.2	7.0	8.5	9.3	9.5	9.5
15	0.30	0.82	1.0	0.8	0.5	1.7	4.0	6.4	7.7	7.9	8.0
14	0.23	0.42	0.7	1.2	1.6	2.6	4.5	6.1	7.2	7.4	7.5
8	0.04	0.17	0.2	0.3	1.7	2.2	4.1	6.1	7.3	7.5	7.5
1	0.10	0.36	0.3	0.8	1.1	1.5	2.8	3.9	4.5	4.7	4.7
6	0.26	0.33	0.4	0.6	0.9	1.3	2.5	4.2	5.0	5.0	5.0
7	0.15	0.45	0.6	0.6	0.9	1.6	3.3	5.3	6.2	6.3	6.3
9	0.13	0.28	0.2	0.5	1.0	1.9	3.8	5.8	6.8	6.9	6.9
5	0.15	0.38	1.1	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9
12	0.10	0.13	0.1	0.2	0.3	0.6	1.4	2.1	2.6	2.6	2.6
11	0.10	0.18	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9
10	0.14	0.46	0.8	1.3	1.3	1.4	1.2	1.0	1.5	1.6	1.6
4	0.13	0.17	0.3	0.5	0.6	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
2	0.14	0.40	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	1.3	1.9	2.0	2.0
3	0.18	0.34	0.6	0.6	0.6	1.9	4.4	7.0	8.9	9.7	9.9
<b>Media</b>	<b>0.15</b>	<b>0.37</b>	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.8</b>	<b>2.9</b>	<b>4.2</b>	<b>4.9</b>	<b>5.1</b>	<b>5.1</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.15	0.42	0.7	1.1	1.5	2.0	2.4	2.9	3.1	3.1	3.1

**Cuadro 11A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
Riego	0.53	1.3	2.7	4.5	5.8	7.1	8.3	9.5	10.1	10.2	10.2
Sequía	0.65	1.5	2.9	4.5	5.3	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
<b>Media</b>	<b>0.59</b>	<b>1.4</b>	<b>2.8</b>	<b>4.5</b>	<b>5.6</b>	<b>6.5</b>	<b>7.2</b>	<b>7.8</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.04	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

**Cuadro 12A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para genotipos de cebada, trigo y triticale en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Cebada	0.49	1.5	3.4	5.9	7.7	9.7	11.4	12.7	13.5	13.6	13.6
Trigo	0.54	1.2	2.5	4.1	5.3	6.4	7.4	8.5	9.0	9.1	9.1
Triticale	0.52	1.3	3.1	5.3	6.9	8.7	10.6	12.5	13.6	13.7	13.7
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.4	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.3	2.3
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.4	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.3	2.3
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.18	0.5	0.8	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	3.0	3.0
<b>Sequía</b>											
Cebada	0.67	1.6	2.9	4.4	5.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
Trigo	0.64	1.4	2.7	4.3	5.1	5.8	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Triticale	0.72	1.9	3.8	5.7	6.6	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.14	0.5	0.9	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05) = Comparación cebada vs. triticale.

**Cuadro 13A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para los genotipos de trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Trigo antiguos	0.51	1.2	2.5	4.4	5.7	7.0	8.4	9.7	10.6	10.8	10.9
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.59	1.3	2.5	4.0	5.0	5.9	6.6	7.3	7.5	7.6	7.6
Trigos modernos	0.53	1.2	2.4	3.9	5.2	6.3	7.3	8.4	8.9	9.0	9.0
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.15	0.4	0.6	1.1	1.3	1.6	1.9	2.2	2.4	2.4	2.4
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.13	0.3	0.6	0.9	1.1	1.4	1.7	1.9	2.1	2.1	2.1
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.13	0.3	0.6	0.9	1.1	1.4	1.7	1.9	2.1	2.1	2.1
<b>Sequía</b>											
Trigo antiguos	0.66	1.5	2.9	4.7	5.5	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.66	1.5	2.9	4.4	5.2	5.9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trigos modernos	0.60	1.3	2.5	4.0	4.8	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
<sup>a</sup> DMS (p≤0.05)	0.11	0.4	0.7	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<sup>b</sup> DMS (p≤0.05)	0.10	0.3	0.6	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<sup>c</sup> DMS (p≤0.05)	0.10	0.3	0.6	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

<sup>a</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos; <sup>c</sup>DMS (p≤0.05)=Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

**Cuadro 14A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.51	1.3	3.1	5.1	6.6	8.1	9.9	11.6	12.6	12.8	12.8
13	0.50	1.7	4.1	7.2	9.3	11.7	13.3	14.6	15.2	15.2	15.2
15	0.52	1.4	3.2	5.5	7.2	9.2	11.3	13.4	14.5	14.7	14.7
14	0.47	1.3	2.8	4.6	6.0	7.7	9.5	10.9	11.8	11.9	11.9
8	0.56	1.3	2.8	4.9	6.6	8.2	9.9	11.7	12.7	12.8	12.8
1	0.54	1.5	3.1	5.2	6.6	7.8	8.9	9.9	10.3	10.4	10.4
6	0.64	1.6	3.0	4.8	6.2	7.4	8.6	10.1	10.7	10.7	10.7
7	0.53	1.2	2.5	4.3	5.7	7.0	8.5	10.3	11.0	11.0	11.0
9	0.51	1.3	2.7	4.7	6.5	7.9	9.6	11.4	12.2	12.2	12.2
5	0.57	1.3	2.4	3.9	4.9	5.8	6.5	6.9	7.0	7.0	7.0
12	0.50	1.1	2.1	3.5	4.4	5.3	6.0	6.5	6.7	6.8	6.8
11	0.58	1.1	2.0	2.9	3.7	4.1	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5
10	0.52	1.2	2.1	3.5	4.3	5.0	5.7	6.2	6.5	6.5	6.5
4	0.55	1.2	2.2	3.3	3.9	4.5	4.8	5.0	5.0	5.0	5.0
2	0.48	1.0	2.0	3.4	4.3	5.0	5.7	6.3	6.7	6.8	6.8
3	0.52	1.1	2.6	4.7	6.3	8.3	10.5	12.9	14.7	15.4	15.5
<b>Media</b>	<b>0.53</b>	<b>1.3</b>	<b>2.7</b>	<b>4.5</b>	<b>5.8</b>	<b>7.0</b>	<b>8.3</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>	<b>10.2</b>	<b>10.2</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.18	0.5	0.8	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	2.9	2.9

**Cuadro 15A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.63	1.6	3.2	5.0	6.0	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
13	0.61	1.8	3.4	5.2	6.1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
15	0.81	2.2	4.3	6.4	7.3	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
14	0.72	1.5	2.4	3.7	4.6	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
8	0.57	1.4	2.9	4.7	5.6	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
1	0.67	1.6	3.3	5.1	6.0	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
6	0.71	1.7	3.3	4.9	5.9	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
7	0.61	1.3	2.5	4.0	4.9	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
9	0.66	1.6	3.0	4.7	5.6	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
5	0.72	1.5	2.8	4.4	5.2	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
12	0.55	1.1	2.2	3.5	4.2	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
11	0.58	1.0	1.9	3.0	3.7	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
10	0.64	1.5	2.8	4.3	5.0	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
4	0.58	1.4	2.6	3.8	4.6	5.5	5.6	5.6	5.7	5.6	5.6
2	0.64	1.4	2.6	3.8	4.6	5.4	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
3	0.69	1.5	3.0	5.1	6.0	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
<b>Media</b>	<b>0.65</b>	<b>1.5</b>	<b>2.9</b>	<b>4.5</b>	<b>5.3</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.14	0.5	0.9	1.2	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

**Cuadro 16A. Transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.57	1.5	3.1	5.1	6.3	7.3	8.1	9.0	9.5	9.6	9.6
13	0.56	1.7	3.7	6.2	7.7	9.2	10.0	10.6	10.9	11.0	11.0
15	0.67	1.8	3.7	5.9	7.3	8.4	9.5	10.6	11.1	11.2	11.2
14	0.60	1.4	2.6	4.1	5.3	6.5	7.4	8.2	8.6	8.7	8.7
8	0.60	1.4	2.9	4.8	6.1	7.2	8.1	9.0	9.5	9.5	9.5
1	0.61	1.6	3.1	5.2	6.3	7.2	7.8	8.2	8.4	8.5	8.5
6	0.67	1.6	3.2	4.9	6.0	6.9	7.6	8.3	8.6	8.6	8.6
7	0.57	1.2	2.5	4.2	5.3	6.3	7.1	8.0	8.3	8.3	8.3
9	0.59	1.4	2.9	4.7	6.0	7.1	7.9	8.8	9.2	9.2	9.2
5	0.64	1.4	2.6	4.2	5.1	5.9	6.2	6.4	6.4	6.4	6.4
12	0.53	1.1	2.1	3.5	4.3	5.1	5.5	5.7	5.9	5.9	5.9
11	0.58	1.1	1.9	2.9	3.7	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
10	0.58	1.3	2.5	3.9	4.7	5.5	5.8	6.0	6.2	6.2	6.2
4	0.56	1.3	2.4	3.6	4.3	5.0	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3
2	0.56	1.2	2.3	3.6	4.4	5.2	5.6	6.0	6.2	6.2	6.2
3	0.60	1.3	2.8	4.9	6.2	7.5	8.5	9.8	10.6	10.9	11.0
<b>Media</b>	<b>0.60</b>	<b>1.4</b>	<b>2.8</b>	<b>4.5</b>	<b>5.6</b>	<b>6.5</b>	<b>7.2</b>	<b>7.8</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.12	0.3	0.6	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6

**Cuadro 17A. Diferencia entre riego - sequía de la transpiración (T) acumulada por planta durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.11	0.40	0.7	1.3	1.6	2.2	3.4	5.2	6.2	6.4	6.4
13	0.11	0.71	1.3	2.8	3.5	4.9	6.6	7.8	8.4	8.5	8.5
15	0.31	0.84	1.1	0.9	0.5	1.5	3.6	5.7	6.8	6.9	6.9
14	0.25	0.43	0.7	1.1	1.5	2.3	4.1	5.5	6.3	6.5	6.5
8	0.04	0.18	0.2	0.3	1.0	1.9	3.6	5.4	6.4	6.5	6.5
1	0.12	0.35	0.4	0.8	1.1	1.5	2.3	3.3	3.7	3.7	3.7
6	0.26	0.32	0.4	0.6	0.9	1.2	2.1	3.5	4.1	4.1	4.1
7	0.15	0.40	0.5	0.6	0.8	1.4	2.8	4.6	5.4	5.4	5.4
9	0.15	0.33	0.2	0.5	0.9	1.7	3.3	5.1	5.9	5.9	5.9
5	0.16	0.36	1.1	1.5	1.5	1.6	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5
12	0.10	0.12	0.1	0.1	0.3	0.5	1.0	1.5	1.7	1.7	1.7
11	0.09	0.16	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
10	0.15	0.45	0.9	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2
4	0.14	0.22	0.4	0.5	0.7	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
2	0.16	0.41	0.6	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.5	1.5	1.5
3	0.19	0.37	0.7	0.6	0.6	1.7	3.9	6.3	8.1	8.7	8.9
<b>Media</b>	<b>0.16</b>	<b>0.38</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>	<b>1.6</b>	<b>2.6</b>	<b>3.7</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>	<b>4.4</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.15	0.43	0.7	1.1	1.5	1.9	2.4	2.8	3.0	3.1	3.1

**Cuadro 18A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Humedad edáfica	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
Riego	0.26	0.51	0.78	1.07	1.29	1.54	1.77	2.03	2.18	2.24	2.25
Sequía	0.23	0.44	0.72	1.02	1.14	1.27	1.37	1.41	1.41	1.41	1.41
<b>Media</b>	<b>0.24</b>	<b>0.48</b>	<b>0.75</b>	<b>1.05</b>	<b>1.21</b>	<b>1.41</b>	<b>1.57</b>	<b>1.72</b>	<b>1.79</b>	<b>1.83</b>	<b>1.83</b>
DMS( $p \leq 0.05$ )	0.004	0.004	0.006	0.005	0.003	0.005	0.006	0.01	0.02	0.02	0.02

**Cuadro 19A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para genotipos de trigo, triticale y cebada en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Cebada	0.27	0.52	0.78	1.07	1.28	1.52	1.75	2.03	2.22	2.32	2.32
Trigo	0.26	0.51	0.78	1.08	1.29	1.54	1.77	2.02	2.17	2.22	2.23
Triticale	0.26	0.51	0.78	1.07	1.28	1.52	1.76	2.04	2.22	2.30	2.30
<sup>a</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.05	0.05
<sup>b</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.05	0.05
<sup>c</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	0.04	0.06	0.06
<b>Sequía</b>											
Cebada	0.22	0.43	0.71	1.00	1.13	1.27	1.36	1.42	1.43	1.43	1.43
Trigo	0.23	0.44	0.72	1.03	1.14	1.28	1.38	1.41	1.41	1.41	1.41
Triticale	0.23	0.44	0.72	1.01	1.13	1.28	1.37	1.42	1.42	1.42	1.42
<sup>a</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
<sup>b</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
<sup>c</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

<sup>a</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación cebada vs. trigo; <sup>b</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación trigo vs. triticale; <sup>c</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación cebada vs. triticale.

**Cuadro 20A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para los genotipos de trigos antiguos, trigos intermedios de la revolución-verde y trigos modernos en riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
<b>Riego</b>											
Trigo antiguos	0.26	0.52	0.79	1.08	1.30	1.54	1.78	2.03	2.22	2.31	2.34
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.26	0.52	0.78	1.08	1.29	1.54	1.77	2.01	2.10	2.10	2.10
Trigos modernos	0.26	0.51	0.78	1.08	1.29	1.54	1.77	2.02	2.17	2.23	2.23
<sup>a</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.05	0.05
<sup>b</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.04
<sup>c</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.04
<b>Sequía</b>											
Trigo antiguos	0.23	0.44	0.72	1.04	1.14	1.28	1.38	1.42	1.43	1.43	1.43
Trigos intermedios de la revolución-verde	0.23	0.44	0.73	1.03	1.14	1.28	1.37	1.39	1.39	1.39	1.39
Trigos modernos	0.23	0.44	0.72	1.03	1.14	1.27	1.38	1.41	1.41	1.41	1.41
<sup>a</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
<sup>b</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<sup>c</sup> DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

<sup>a</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación trigos antiguos vs. trigos intermedios de la revolución-verde; <sup>b</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación trigos antiguos vs. trigos modernos;

<sup>c</sup>DMS ( $p \leq 0.05$ ) = Comparación trigos intermedios de la revolución-verde vs. trigos modernos.

**Cuadro 21A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SP1}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.25	0.51	0.77	1.07	1.27	1.51	1.76	2.04	2.21	2.32	2.31
13	0.26	0.51	0.77	1.06	1.28	1.52	1.74	2.03	2.21	2.31	2.31
15	0.26	0.51	0.78	1.07	1.29	1.52	1.75	2.04	2.22	2.30	2.30
14	0.28	0.52	0.77	1.06	1.28	1.51	1.74	2.03	2.21	2.33	2.33
8	0.26	0.52	0.77	1.07	1.28	1.55	1.76	2.06	2.21	2.30	2.30
1	0.27	0.51	0.79	1.08	1.29	1.54	1.78	2.04	2.21	2.31	2.31
6	0.26	0.52	0.78	1.07	1.27	1.55	1.76	2.02	2.21	2.23	2.23
7	0.26	0.51	0.77	1.06	1.27	1.53	1.77	2.03	2.21	2.27	2.27
9	0.26	0.51	0.78	1.06	1.28	1.53	1.76	2.01	2.21	2.30	2.30
5	0.26	0.50	0.78	1.07	1.29	1.54	1.77	2.04	2.11	2.11	2.11
12	0.26	0.51	0.78	1.09	1.29	1.56	1.77	2.02	2.21	2.25	2.25
11	0.26	0.50	0.78	1.08	1.28	1.55	1.78	1.97	1.97	1.97	1.97
10	0.26	0.51	0.78	1.07	1.29	1.54	1.79	2.05	2.21	2.29	2.29
4	0.27	0.53	0.78	1.07	1.30	1.53	1.78	1.96	1.97	1.97	1.97
2	0.26	0.51	0.78	1.07	1.29	1.54	1.77	2.01	2.21	2.28	2.28
3	0.26	0.52	0.78	1.08	1.31	1.53	1.78	2.03	2.22	2.34	2.43
<b>Media</b>	<b>0.26</b>	<b>0.51</b>	<b>0.78</b>	<b>1.07</b>	<b>1.29</b>	<b>1.54</b>	<b>1.76</b>	<b>2.02</b>	<b>2.18</b>	<b>2.24</b>	<b>2.25</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	0.04	0.06	0.06

**Cuadro 22A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SP1}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.23	0.44	0.72	1.01	1.12	1.29	1.38	1.42	1.42	1.42	1.42
13	0.22	0.43	0.71	1.00	1.13	1.26	1.37	1.42	1.42	1.42	1.42
15	0.22	0.43	0.71	1.01	1.13	1.28	1.36	1.41	1.41	1.41	1.41
14	0.22	0.43	0.70	1.00	1.13	1.27	1.36	1.42	1.42	1.43	1.43
8	0.22	0.43	0.71	1.03	1.12	1.26	1.38	1.42	1.42	1.42	1.42
1	0.24	0.44	0.71	1.04	1.13	1.28	1.39	1.42	1.42	1.42	1.42
6	0.23	0.43	0.74	1.02	1.13	1.29	1.38	1.42	1.42	1.42	1.42
7	0.23	0.43	0.70	1.01	1.14	1.27	1.37	1.41	1.41	1.41	1.41
9	0.22	0.43	0.71	1.02	1.13	1.28	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40
5	0.24	0.44	0.71	1.02	1.14	1.26	1.36	1.37	1.37	1.37	1.37
12	0.24	0.45	0.71	1.03	1.14	1.27	1.38	1.41	1.41	1.41	1.41
11	0.24	0.44	0.73	1.02	1.14	1.26	1.37	1.38	1.38	1.38	1.38
10	0.22	0.43	0.74	1.03	1.14	1.27	1.36	1.39	1.39	1.39	1.39
4	0.22	0.43	0.74	1.04	1.14	1.28	1.36	1.38	1.38	1.38	1.38
2	0.23	0.44	0.72	1.04	1.14	1.28	1.37	1.42	1.42	1.42	1.42
3	0.24	0.44	0.72	1.04	1.15	1.27	1.38	1.43	1.43	1.44	1.44
<b>Media</b>	<b>0.23</b>	<b>0.44</b>	<b>0.72</b>	<b>1.02</b>	<b>1.14</b>	<b>1.27</b>	<b>1.37</b>	<b>1.41</b>	<b>1.41</b>	<b>1.41</b>	<b>1.41</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

**Cuadro 23A. Evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SPI}$ ) acumulada durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada en promedio de riego y sequía. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.24	0.47	0.74	1.04	1.19	1.40	1.57	1.72	1.81	1.86	1.86
13	0.24	0.47	0.74	1.03	1.21	1.39	1.56	1.73	1.82	1.87	1.87
15	0.24	0.47	0.74	1.04	1.20	1.40	1.55	1.73	1.81	1.85	1.85
14	0.25	0.47	0.74	1.03	1.20	1.39	1.55	1.72	1.82	1.88	1.88
8	0.24	0.47	0.74	1.05	1.20	1.40	1.57	1.74	1.82	1.86	1.86
1	0.25	0.47	0.75	1.06	1.22	1.41	1.58	1.73	1.82	1.87	1.87
6	0.24	0.48	0.76	1.05	1.20	1.41	1.57	1.72	1.82	1.82	1.82
7	0.24	0.47	0.74	1.04	1.21	1.40	1.57	1.73	1.81	1.84	1.84
9	0.23	0.47	0.74	1.04	1.20	1.40	1.57	1.70	1.81	1.85	1.85
5	0.25	0.47	0.74	1.04	1.21	1.40	1.56	1.71	1.74	1.74	1.74
12	0.24	0.48	0.75	1.06	1.21	1.41	1.57	1.72	1.81	1.83	1.83
11	0.25	0.47	0.75	1.05	1.21	1.41	1.58	1.67	1.68	1.68	1.68
10	0.24	0.47	0.75	1.04	1.21	1.40	1.57	1.72	1.80	1.85	1.84
4	0.25	0.48	0.76	1.06	1.22	1.40	1.57	1.66	1.67	1.67	1.67
2	0.24	0.48	0.74	1.05	1.21	1.41	1.57	1.72	1.82	1.85	1.85
3	0.25	0.48	0.75	1.06	1.23	1.41	1.58	1.73	1.83	1.89	1.93
<b>Media</b>	<b>0.24</b>	<b>0.48</b>	<b>0.75</b>	<b>1.05</b>	<b>1.21</b>	<b>1.41</b>	<b>1.57</b>	<b>1.72</b>	<b>1.79</b>	<b>1.83</b>	<b>1.83</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06

**Cuadro 24A. Diferencia entre riego - sequía de la evaporación directa del suelo debajo de la planta ( $E_{SP1}$ ) acumulada en promedio durante el experimento para todos los genotipos de trigo, triticale y cebada. Ciclo verano-otoño 2019. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.**

Genotipo	Días después del trasplante (ddt)										
	15	31	45	62	77	92	107	122	136	150	169
16	0.03	0.07	0.05	0.06	0.15	0.23	0.38	0.62	0.80	0.88	0.88
13	0.04	0.08	0.07	0.06	0.15	0.25	0.38	0.61	0.79	0.88	0.88
15	0.03	0.07	0.07	0.07	0.16	0.24	0.39	0.63	0.81	0.88	0.88
14	0.06	0.09	0.07	0.06	0.15	0.25	0.39	0.61	0.78	0.89	0.90
8	0.03	0.09	0.06	0.04	0.16	0.29	0.37	0.64	0.79	0.88	0.88
1	0.03	0.07	0.07	0.04	0.16	0.25	0.39	0.62	0.80	0.89	0.89
6	0.03	0.09	0.04	0.05	0.14	0.26	0.37	0.60	0.79	0.81	0.81
7	0.03	0.07	0.07	0.05	0.13	0.25	0.39	0.62	0.79	0.85	0.84
9	0.04	0.07	0.07	0.04	0.16	0.25	0.37	0.61	0.81	0.89	0.89
5	0.03	0.06	0.07	0.05	0.15	0.27	0.42	0.67	0.74	0.74	0.74
12	0.03	0.06	0.07	0.05	0.15	0.28	0.39	0.62	0.80	0.84	0.84
11	0.02	0.06	0.06	0.07	0.14	0.28	0.41	0.58	0.58	0.58	0.58
10	0.04	0.07	0.05	0.04	0.14	0.26	0.42	0.65	0.81	0.89	0.89
4	0.04	0.09	0.04	0.03	0.16	0.25	0.43	0.58	0.59	0.59	0.59
2	0.02	0.07	0.07	0.03	0.15	0.26	0.40	0.59	0.78	0.85	0.85
3	0.02	0.07	0.06	0.03	0.16	0.26	0.40	0.62	0.79	0.90	0.99
<b>Media</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.15</b>	<b>0.26</b>	<b>0.40</b>	<b>0.62</b>	<b>0.77</b>	<b>0.82</b>	<b>0.83</b>
DMS ( $p \leq 0.05$ )	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05