



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GANADERÍA

VARIABILIDAD EN RENDIMIENTO DE FORRAJE Y RESISTENCIA A SEQUÍA EN ALFALFA

MILTON JAVIER LUNA GUERRERO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO


2020

La presente tesis titulada: **Variabilidad en rendimiento de forraje y resistencia a sequía en alfalfa**, realizada por el (la) alumno (a): **Milton Javier Luna Guerrero**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

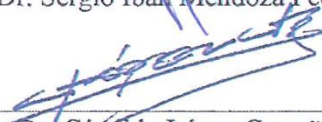
DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA

CONSEJO PARTICULAR


CONSEJERO:


Dr. Sergio Iban Mendoza Pedroza

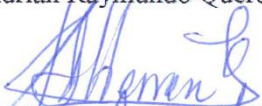
DIRECTOR DE TESIS:


Dr. Cándido López Castañeda

ASESOR:


Dr. Adrián Raymundo Quero Carrillo

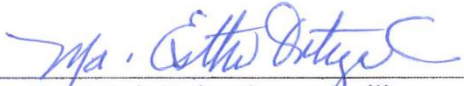
ASESOR:


Dr. José Guadalupe Herrera Haro

ASESOR:


Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández

ASESOR:


Dra. María Esther Ortega Cerilla

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2020.

VARIABILIDAD EN RENDIMIENTO DE FORRAJE Y RESISTENCIA A SEQUÍA EN ALFALFA

Milton Javier Luna Guerrero, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

El déficit hídrico del suelo disminuye el rendimiento y calidad del forraje en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.). El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de las deficiencias de humedad edáfica en el rendimiento de materia seca y sus componentes morfológicos, relaciones hídricas e intercambio gaseoso de la planta, evapotranspiración (E_T), transpiración (T), evaporación directa del suelo (E_S), eficiencia transpiratoria (ET), y características de crecimiento del sistema radical, en diez variedades de alfalfa en riego (R) y sequía (S). El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en R y cuatro en S. La unidad experimental fue una planta individual trasplantada en un tubo de PVC de 4" de diámetro y 1 m de alto, 20 días después de la siembra en charolas de plástico. Las plantas se fertilizaron con la dosis 60-140-00 a los 44, 240 y 420 días después del trasplante (ddt). En R el contenido de humedad del suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo entre 20 y 406 ddt (R_1) y entre 406 y 798 ddt (R_2). En S la aplicación de agua se suspendió entre 345 y 406 ddt (61 días, S_1) y entre 628 y 686 ddt (68 días, S_2). El riego de recuperación (RR) se aplicó en el último día de S [$S_1=RR_1$ (406 ddt) y $S_2=RR_2$ (686 ddt)]. El rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca en hojas (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUA) en S_1 y S_2 , y después del RR_1 y RR_2 , mostraron valores inferiores a los registrados en riego (R_1 y R_2) hasta la finalización del experimento. No obstante, en S_1 y S_2 , la

relación H:T fue mayor que en riego (R_1 y R_2) durante el tratamiento de S y menor que en R (R_1 y R_2) después del RR_1 y RR_2 . La AP en S_1 y S_2 mostró valores más bajos que en R_1 y R_2 , pero después de la aplicación de RR_1 y RR_2 , la AP se recuperó igualando a la AP observada en R_1 y R_2 . El análisis de los componentes de varianza mostró que la varianza fenotípica para el RMST, RMSH, H:T, AP, NT y EUR en riego (R_1 y R_2) fue mayor que en sequía (S_1 y S_2). Asimismo, la varianza genética aditiva fue mayor que la varianza genética de dominancia para todos los caracteres medidos en las plantas en riego y sequía. La heredabilidad en sentido estricto fue de baja para el RMSH a moderada para el RMST, H:T, AP, NT y EUR en R y S. El déficit hídrico del suelo redujo el potencial hídrico foliar (ψ) y los potenciales osmótico (π) y de turgencia (P), la tasa asimilación (A), transpiración (E) y conductancia estomática (g), alcanzando sus valores más bajos al final de los tratamientos S_1 ($\psi = -3.1$, $\pi = -3.5$ y $P = 0.4$ MPa; $A = 4.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 0.022 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $g = 0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y S_2 ($\psi = -3.5$, $\pi = -3.7$ y $P = 0.2$ MPa; $A = 4.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 0.019 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $g = 0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las plantas bajo sequía desarrollaron una alta capacidad de ajuste osmótico y alta eficiencia en el uso del agua (W), mostrando valores finales de 1.70 MPa y $0.0058 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ en S_1 , y 1.96 MPa y $0.0061 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ en S_2 . La E_T , T y E_S en los tubos de PVC en R (R_1 y R_2) presentaron valores más altos que los observados en S (S_1 y S_2). La ET tuvo valores mayores en S (S_1 y S_2) que en R (R_1 y R_2) hasta la aplicación del RR_1 y RR_2 . El déficit hídrico del suelo promovió mayor crecimiento de las raíces en todos los estratos del suelo y esto se reflejó en un mayor peso seco total de raíces, y una mayor proporción de raíces/parte aérea que en R. El peso seco de corona y de la parte aérea, así como el índice de cosecha fueron más altos en R que en S al finalizar el experimento. Se determinó que las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia mostraron el mejor comportamiento en todos los caracteres medidos tanto en R como en S, por lo que estas variedades

podrían recomendarse, para su uso comercial en las praderas de los agricultores y/o en los programas de mejoramiento genético del rendimiento de la alfalfa.

Palabras clave: Características de las raíces, eficiencia transpiratoria, intercambio gaseoso, relaciones hídricas, rendimiento de materia seca y sus componentes morfológicos.

VARIABILITY IN FORAGE YIELD AND DROUGHT RESISTANCE IN ALFALFA

Milton Javier Luna Guerrero, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

The water deficit in the soil decreases the yield and quality of forage in the cultivation of alfalfa (*Medicago sativa* L.). The objective of this study was to determine the effect of soil moisture deficiencies on the yield of dry matter and its morphological components, water relations and gaseous exchange of the plant, evapotranspiration (E_T), transpiration (T), direct evaporation from the soil (E_S), transpiration efficiency (TE), and growth characteristics of the root system, in ten varieties of alfalfa in irrigation (I) and drought (D). The experiment was established under a randomized complete block design with four replicates in I and four replicates in D. The experimental unit was a single plant transplanted into PVC tubes, 4" diameter and 1 m height, 20 days after planting seeds in plastic trays. The plants were fertilized with a rate of 60-140-00 at 44, 240, and 420 days after transplantation (ddt). In I the soil moisture content was maintained at near its field capacity between 20 and 406 ddt (I_1) and between 406 and 798 ddt (I_2). In D the water application was suspended between 345 and 406 ddt (61 days, D_1) and between 628 and 686 ddt (68 days, D_2). Recovery irrigation (RI) was applied on the last day of D [$D_1=RI_1$ (406 ddt) and $D_2=RI_2$ (686 ddt)]. Total dry matter yield (TDMY), leaf dry matter yield (LDMY), leaf:stem ratio (L:S), plant height (PH), number of stems (NS) and radiation use efficiency (RUE) in D (D_1 and D_2), and after RI_1 and RI_2 , showed lower values than those recorded in I (I_1 and I_2) until the end of the experiment. However, in D_1 and D_2 , the H:T ratio was higher than at I (I_1 and I_2) during the treatment of D and lower than in I (I_1 and I_2) after RI_1 and RI_2 . The PH in D_1 and D_2 showed lower values than in I_1 and I_2 , but after the application of RI_1 and RI_2 , the PH recovered equaling the PH

observed in I₁ and I₂. The analysis of variance components showed that the phenotypic variance for TDMY, LDMY, H:T ratio, PH, NS and EUR in I (I₁ and I₂) was higher than in D (D₁ and D₂). Also, the additive genetic variance was higher than the dominance genetic variance for all the characters measured in the irrigated and dry plants. Heritability in the strict sense was low for LDMY to moderate for TDMY, H:T ratio, PH, NS and EUR in I and D. Soil water deficit reduced leaf water potential (ψ) and osmotic (π) and turgidity (P) potentials, assimilation rate (A), transpiration rate (E) and stomatal conductance (g), reaching their lowest values at the end of the D treatments; D₁ ($\psi = -3.1$, $\pi = -3.5$ and $P = 0.4$ MPa; $A = 4.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 0.022 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $g = 0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and D₂ ($\psi = -3.5$, $\pi = -3.7$ and $P = 0.2$ MPa; $A = 4.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 0.019 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $g = 0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Plants under drought developed a high osmotic adjustment capacity and high water use efficiency (W), showing final values of 1.70 MPa and $0.0058 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ in D₁, and 1.96 MPa and $0.0061 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ in D₂. The E_T , T and E_S in the PVC pipes in I (I₁ and I₂) presented higher values than those observed in D (D₁ and D₂). The TE in D (D₁ and D₂) had higher values than in I (I₁ and I₂) until the application of RI₁ and RI₂. The soil water deficit promoted greater root growth in all the soil layers and this was reflected in a greater total dry weight of roots, and a greater proportion of roots/shoots than in I. The dry weight of crown and shoot parts, as well as the harvest index were higher in I than in D at the end of the experiment. It was determined that the Genex, Atlixco, Jupiter, and Milenia varieties showed the best performance in all characteristics measured in both I and D, so these varieties could be recommended for commercial use in farmer's fields and/or in alfalfa yield improvement programs.

Keywords: Gas exchange, root characteristics, total dry matter yield and its morphological components, transpiration efficiency, water relationships.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por brindarme la oportunidad de formarme como Doctor en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme el financiamiento necesario para realizar mis estudios.

Al Dr. Cándido López Castañeda por su amistad, el tiempo dedicado, enseñanzas, la buena dirección, apoyo y sus sabios consejos en mi formación personal y profesional, ha sido un honor conocerlo.

Al Dr. Alfonso Hernández Garay (Q. E. P. D.) por sus valiosas enseñanzas, su motivación, sus valiosos consejos, amistad y su orientación hacia una educación integral, fue un honor conocerlo.

Al Dr. Sergio Iban Mendoza Pedroza por su valiosa amistad, apoyo en la dirección del trabajo y consejos.

Al Dr. Adrián Raymundo Quero Carrillo por su amistad, buenos consejos, apoyo y valiosas observaciones y correcciones del trabajo de investigación.

Al Dr. José Guadalupe Herrera Haro por su disponibilidad, apoyo y valiosas observaciones a la tesis.

A la Dra. María Esther Ortega Cerrilla por su valioso apoyo y aportación en la tesis.

Al Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández por brindarme su apoyo y contribución al presente trabajo de investigación.

Al Sr. Fidel Pérez Romero, por el apoyo brindado para el desarrollo de mi trabajo experimental.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Objetivos	2
Hipótesis	3
Literatura citada	3
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Efecto de la sequía en el rendimiento de materia seca y sus componentes	5
Efecto de la sequía en las relaciones hídricas y ajuste osmótico	5
Efecto de la sequía en la fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática	6
Evapotranspiración, transpiración y eficiencia transpiratoria	7
Efecto de la sequía en el crecimiento del sistema radical	8
Literatura citada	9
CAPÍTULO I. VARIABILIDAD GENÉTICA EN BIOMASA AÉREA Y SUS COMPONENTES, Y RESISTENCIA A SEQUÍA EN ALFALFA	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS	13
1.2.1 Sitio experimental	13
1.2.2 Germoplasma	14
1.2.3 Diseño experimental	14
1.2.4 Variables medidas y calculadas	15
1.2.5 Temperatura del invernadero	16
1.2.6 Contenido de humedad del suelo	16
1.2.7 Análisis estadístico	16
1.2.8 Estimación de la varianza fenotípica y sus componentes, y la heredabilidad	17
1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19

1.3.1	Contenido hídrico del suelo	19
1.3.2	Análisis estadístico.....	20
1.3.3	Varianza fenotípica y sus componentes, y heredabilidad	24
1.3.4	Biomasa aérea y sus componentes	25
1.3.5	Análisis de componentes principales	41
1.4	CONCLUSIONES	42
1.5	LITERATURA CITADA.....	43
CAPÍTULO II. RELACIONES HÍDRICAS E INTERCAMBIO GASEOSO EN ALFALFA BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO.....		46
2.1	INTRODUCCIÓN.....	46
2.2	Materiales y Métodos	48
2.2.1	Información del experimento	48
2.2.2	Variables medidas y calculadas.....	48
2.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
2.3.1	Contenido hídrico del suelo	49
2.3.2	Análisis de varianza.....	50
2.3.3	Relaciones hídricas	53
2.3.4	Ajuste osmótico.....	58
2.3.5	Relaciones de intercambio gaseoso	61
2.4	CONCLUSIONES.....	69
2.5	LITERATURA CITADA.....	69
CAPITULO III. EVAPOTRANSPIRACIÓN, TRANSPIRACIÓN, EFICIENCIA TRANSPIRATORIA Y MATERIA SECA DE RAÍCES EN ALFALFA BAJO RIEGO Y SEQUÍA.....		72
3.1	INTRODUCCIÓN.....	72
3.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	75
3.2.1	Variables medidas y calculadas.....	75
3.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
3.3.1	Análisis estadístico.....	77

3.3.2	Comportamiento de los genotipos en riego (R ₁ y R ₂)	79
3.3.3	Comportamiento de los genotipos en sequía (S ₁ y S ₂)	82
3.3.4	Características morfológicas del sistema radical	86
3.3.5	Riego vs. sequía	89
3.3.6	Análisis de componentes principales	92
3.4	CONCLUSIONES	93
3.5	LITERATURA CITADA.....	94
CONCLUSIONES GENERALES		96
ANEXOS		97
ANEXO A.....		97
ANEXO B.....		109
ANEXO C.....		114

LISTA DE CUADROS

Página

Cuadro 3.1. Análisis de varianza fenotípica y sus componentes para 10 variedades de alfalfa evaluadas en diferentes fechas de corte (fc) y en riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2).	18
Cuadro 3.2. Fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hojas (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR), determinados en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en 10 variedades de alfalfa en riego (R_1) y sequía (S_1) en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	21
Cuadro 3.3. Fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hojas (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR), determinados en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en 10 variedades de alfalfa en riego (R_2) y sequía (S_2) en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	23
Cuadro 3.4. Parámetros genéticos estimados para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hoja (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	25
Cuadro 4.1. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de la suma de cuadrados para el potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P); tasa de asimilación neta (A), tasa de transpiración (E) y conductancia estomática (g), y eficiencia en el uso del agua (W), temperatura de la hoja (T) y (contenido relativo de agua (%)), determinados riego y sequía en 10 variedades de alfalfa. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	52

Cuadro 5.1. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para la evapotranspiración (E_T), transpiración (T), eficiencia transpiratoria (ET) y rendimiento de materia seca total (RMST), para 10 variedades de alfalfa bajo riego y sequía. Montecillo, Texcoco, Estado de México.77

Cuadro 5.2. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el peso seco de la corona (PSC), peso seco de raíces (PSR) en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA) en 10 variedades de alfalfa bajo riego y sequía. Montecillo, Texcoco, Estado de México.79

Cuadro 5.3. Peso seco de corona (PSC), peso seco de raíces (PSR) determinado en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de la parte aérea (PSPA), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para 10 variedades de alfalfa en riego y sequía en invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.87

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1. Contenido hídrico del suelo en los tratamientos de riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2) durante el experimento, en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC=Capacidad de campo y PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente. RR_1 =Riego de recuperación 1; RR_2 =Riego de recuperación 2.....	20
Figura 3.2. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en riego (R_1), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	27
Figura 3.3. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), en nueve cortes de la parte aérea de la planta en riego (R_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	30
Figura 3.4. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en sequía (S_1), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	33
Figura 3.5. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en sequía (S_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	35
Figura 3. 6. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en riego	

(R ₁ y R ₂) y sequía (S ₁ y S ₂), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	40
Figura 3.7. Plano de biplot del rendimiento de materia seca versus rendimiento de materia seca total, rendimiento de materia seca de hojas, relación H:T, número de tallos, altura de planta y eficiencia en el uso de la radiación en riego (R ₁ y R ₂) y sequía (S ₁ y S ₂), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	42
Figura 4.1. Contenido hídrico del suelo en los tratamientos de riego (R ₁ y R ₂) y sequía (S ₁ y S ₂) durante el experimento, en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC=Capacidad de campo y PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente	50
Figura 4. 2. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R ₁) y sequía (S ₁) (a, b y c), y riego (R ₂) y sequía (S ₂) (d, e y f) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	54
Figura 4. 3. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R ₁) (a, b y c), y sequía (S ₁) (d, e y f) para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	56
Figura 4.4. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R ₂) (a, b y c), y sequía (S ₂) (d, e y f) para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	57
Figura 4. 5. Capacidad de ajuste osmótico de las plantas sometidas a dos periodos de sequía (S ₁ y S ₂) y sus respectivos periodos de riego (R ₁ y R ₂) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	59
Figura 4.6. Capacidad de ajuste osmótico de la planta en S ₁ (a) y S ₂ (b) y sus respectivos periodos de riego (R ₁ y R ₂), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	61
Figura 4.7. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R ₁) y sequía (S ₁) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México....	63

Figura 4.8. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R_2) y sequía (S_2) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México....	64
Figura 4. 9. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R_1) y sequía (S_2) (e, f, g y h), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	67
Figura 4. 10. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R_1) y sequía (S_2) (e, f, g y h), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	68
Figura 5.1. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b) y eficiencia transpiratoria (c) en riego (R_1) y evapotranspiración (d), tasa de transpiración (e) y eficiencia transpiratoria (f) en riego (R_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	82
Figura 5.2. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b) y eficiencia transpiratoria (c) en sequía (S_1) y evapotranspiración (d), tasa de transpiración (e) y eficiencia transpiratoria (f) en sequía (S_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	85
Figura 5.3. Peso seco de raíces en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm en riego (a) y sequía (b), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	89
Figura 5.4. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b), evaporación directa del suelo (c) y eficiencia transpiratoria (d) en riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.....	91
Figura 5.5. Plano biplot para la eficiencia transpiratoria (ET) vs. evapotranspiración (Et), transpiración (T), peso seco de raíz (PSR) en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de corona (PSC), peso seco de la parte aérea (PSPA), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.	93

ANEXOS

Cuadro A1. Rendimiento de materia seca total (g de MS planta ⁻¹) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	97
Cuadro A2. Rendimiento de materia seca total (g de MS planta ⁻¹) en riego S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	98
Cuadro A3. Rendimiento de materia seca de hojas (g de MS planta ⁻¹) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	99
Cuadro A4. Rendimiento de materia seca de hojas (g de MS planta ⁻¹) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	100
Cuadro A5. Relación hoja:tallo en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	101
Cuadro A6. Relación hoja:tallo en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	102
Cuadro A7. Altura de planta (cm) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	103
Cuadro A8. Altura de planta (cm) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	104
Cuadro A9. Número de tallos en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	105
Cuadro A10. Número de tallos en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	106

Cuadro A11. Eficiencia en el uso de la radiación (g de MS MJ ⁻¹) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	107
Cuadro A12. Eficiencia en el uso de la radiación (g de MS MJ ⁻¹) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	108
Cuadro B1. Potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P) en riego R ₁ y sequía S ₁ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	109
Cuadro B2. Potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P) en riego R ₂ y sequía S ₂ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	110
Cuadro B3. Ajuste osmótico en riego-sequía en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	111
Cuadro B4. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (gi), tasa de transpiración (E) y eficiencia en el uso de agua (EUA) en riego R ₁ y sequía S ₁ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	112
Cuadro B5. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (gi), tasa de transpiración (E) y eficiencia en el uso de agua (EUA) en riego R ₂ y sequía S ₂ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	113
Cuadro C1. Evapotranspiración (kg de H ₂ O) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	114
Cuadro C2. Evapotranspiración (kg de H ₂ O) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	115
Cuadro C3. Transpiración (kg de H ₂ O) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	116

Cuadro C4. Transpiración (kg de H ₂ O) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.	117
Cuadro C5. Eficiencia transpiratoria (g de MS/kg de H ₂ O) en riego R ₁ (112 a 434 ddt) y R ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	118
Cuadro C6. Eficiencia transpiratoria (g de MS/kg de H ₂ O) en sequía S ₁ (112 a 434 ddt) y S ₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.....	119

INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, la mayor proporción de actividades agropecuarias productivas se lleva a cabo en condiciones de temporal, debido a una baja disponibilidad de humedad para el crecimiento y desarrollo de plantas. La escasez de agua y las amplias variaciones en temperatura del aire causan estrés ambiental, que puede afectar grandemente la productividad y la seguridad alimentaria, sobre todo en las zonas menos desarrolladas económicamente. Esta situación puede ser agudizada por las deficiencias hídricas frecuentes y el aumento en la temperatura atmosférica, producto del cambio climático global.

Por tal motivo, para poder atender la demanda de alimentos para los animales y en particular la producción de forrajes, se requiere una oferta suficiente para satisfacer las necesidades de los productores pecuarios. La alfalfa por su amplia adaptación a distintos tipos de suelos, climas variables y prácticas de manejo agronómico es el cultivo que mayores posibilidades ofrece para una producción sostenida de forraje. Esta especie, lo mismo se cultiva en zonas templadas con disponibilidad de riego que en zonas semiáridas y áridas, donde la disponibilidad limitada de lluvia y riego, causan reducciones significativas en el rendimiento y calidad de la materia seca.

Los estudios agronómicos del rendimiento y calidad del forraje deben enfocarse a la obtención de nuevas variedades de alfalfa con amplia adaptación a factores bióticos y abióticos adversos, para asegurar la producción de altos rendimientos y calidad del alimento forrajero. Entre los factores abióticos desfavorables más importantes, están los daños causados por el estrés hídrico y el estrés por temperaturas altas o calor. Se están haciendo esfuerzos para seleccionar genotipos de alfalfa que tengan, además de resistencia genética a la sequía y calor, alto rendimiento y calidad de forraje (Luna-Guerrero *et al.*, 2018).

En este contexto, se considera muy importante la exploración de la variación genética en el rendimiento y sus componentes en condiciones favorables y desfavorables de humedad en el suelo, para determinar la magnitud de la varianza aditiva de estos caracteres y la respuesta de las plantas al déficit hídrico, y calor en condiciones controladas, de tal forma que esto permita normar criterios de selección más efectivos para la identificación de germoplasma sobresaliente bajo condiciones de estrés abiótico. La identificación y utilización de características fisiológicas, anatómicas y morfológicas de la planta, sin duda ayudaran en la identificación de mecanismos importantes, para la resistencia a sequía de la planta; p. ej., el ajuste osmótico de la célula y su relación con un mayor desarrollo de las raíces bajo sequía ofrece un potencial muy valioso para la selección en condiciones de estrés hídrico (Barrios-Gómez *et al.*, 2011; Blum, 2015). Otros aspectos agronómicos importantes tienen relación con el crecimiento del sistema radical de las plantas y se han identificado como factores críticos, para la tolerancia de las plantas a la sequía (López-Castañeda y Richards, 1994; Zhang *et al.*, 2019). La extracción de humedad por las raíces de estratos profundos del suelo en condiciones de escasez de agua, parece ser uno de los aspectos más importantes en la selección de variedades mejoradas de alfalfa bajo sequía (Quan *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2018).

Objetivos

1.1.1.- Determinar la variabilidad genética del rendimiento de materia seca y sus componentes en 10 variedades de alfalfa en condiciones de riego y sequía en invernadero.

1.1.2.- Conocer el comportamiento de 10 variedades de alfalfa en las relaciones hídricas, intercambio gaseoso y eficiencia en el uso del agua de la planta en condiciones de riego y sequía en invernadero.

1.1.3.- Describir la variabilidad en la evapotranspiración, transpiración y eficiencia transpiratoria, y en las características de crecimiento del sistema radical de 10 variedades de alfalfa en condiciones de riego y sequía en invernadero.

Hipótesis

1.2.1- El déficit hídrico del suelo reduce la productividad y afecta la capacidad de recuperación de la planta al estrés.

1.2.2.- La sequía afecta los procesos fisiológicos de la planta y modifica su respuesta genético-fisiológica al estrés.

1.2.3.- Las deficiencias hídricas del suelo reducen la evapotranspiración y transpiración de la planta y modifican las características de crecimiento del sistema radical.

Literatura citada

- Barrios-Gómez, E.J., C. López-Castañeda y J. Kohashi-Shibata. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo 'Flor de Mayo'. *Agronomía Costarricense* 35(1): 131-145.
- Blum, A. 2015. Stress, strain, signaling, and adaptation – not just a matter of definition. *Journal of Experimental Botany* 67(3): 562-565.
- Huang, Z., Y. Liu, Z. Cui, Y. Fang, H.H. He, B.R. Liu, G.L. Wu. 2018. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China). *Field Crops Research* 221: 1–6.
- López-Castañeda, C. and R.A. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristics. *Field Crops Research* 37:51-62.
- Luna-Guerrero, M.J., C. López-Castañeda, A. Hernández-Garay, P.A. Martínez-Hernández y Ma.E. Ortega-cerrilla. 2018. Evaluación del rendimiento de materia seca y sus componentes en germoplasma de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 9(3): 486-505.

Quan, W.L., X. Liu, H.Q.Wang, and Z.L. Chan. 2016. Comparative physiological and transcriptional analyses of two contrasting drought tolerant alfalfa varieties. *Frontiers in Plant Science* 6:1256.

Zhang C., Shi., S., Liu., Z., Yang, F. and Yin, G. 2019. Drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties is associated with enhanced antioxidative protection and declined lipid peroxidation. *J. Plant Physiol.* 232:226-240.

REVISIÓN DE LITERATURA

Efecto de la sequía en el rendimiento de materia seca y sus componentes

La sequía redujo el peso seco del forraje total de hojas linealmente con la altura de la planta, al obtener como resultado un mayor peso seco de hojas que de tallos y una mejor calidad forrajera (Brown y Tanner, 1986). En otra investigación en condiciones de invernadero se evaluaron 74 genotipos de alfalfa en riego y estrés hídrico (humedad al 40 % de la capacidad de campo por 14 días), observando que los genotipos tolerantes a sequía redujeron menos la altura de la planta y el número de brotes que los genotipos susceptibles a estrés hídrico (Petcu *et al.*, 2019).

Efecto de la sequía en las relaciones hídricas y ajuste osmótico

Las relaciones hídricas entre el suelo y la planta son una indicación del estado hídrico de la planta y el suelo; en condiciones de sequía, el potencial hídrico y sus componentes (potencial osmótico y de turgencia) disminuyen con la reducción en la disponibilidad de agua en el suelo. Al respecto, Peterson *et al.* (1992) observaron que el potencial hídrico medido al medio día en alfalfa bajo riego y sequía disminuyó de -0.1 a -1.3 MPa y -1.3 a -3.8 MPa, respectivamente; disminución del potencial hídrico que se reflejó en una reducción del 33 % en el rendimiento de materia seca en condiciones de estrés hídrico con respecto a las plantas bajo riego. Grimes *et al.*, (1992) determinaron que a medida que el potencial hídrico de la planta fue inferior a -1 MPa, se observó una reducción significativa en el rendimiento de materia seca en los cultivares de alfalfa Cuf 101, Moapa 69 y WL 318.

Cuando el déficit hídrico del suelo continúa por periodos de tiempo más largos, las plantas tienen posibilidades de desarrollar su capacidad de ajuste osmótico. El ajuste osmótico es un proceso químico-fisiológico, mediante el cual, la planta disminuye el potencial osmótico de sus células, al

aumentar la concentración activa de solutos que le permiten mantener niveles de turgencia que pueden facilitar la sobrevivencia de la planta en condiciones de déficit hídrico severos (Barrios-Gómez *et al.*, 2011). En alfalfa, en condiciones de campo con sequía, se determinó que el déficit hídrico indujo a las plantas a ajustarse osmóticamente, al aumentar la concentración de prolina, azúcares solubles totales, aminoácidos y potasio en el citoplasma de las células, con una relación estrecha entre la concentración de prolina y algunos osmolitos, evidenciando que este es un indicador importante de tolerancia al estrés por sequía, aunque esta tolerancia se reflejó en una disminución significativa en la producción de materia seca de hojas (Abid *et al.*, 2016).

Efecto de la sequía en la fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática

El efecto de la sequía en procesos fisiológicos y metabólicos de la planta como la fotosíntesis, conductancia estomática, concentración intercelular de CO₂, punto de compensación de CO₂, curvas de respuesta a la luz, fotorespiración, contenido de clorofila y actividad de la enzima ribulosa 1,5-bifosfato carboxilasa (RuBP), se estudió en condiciones de invernadero en el cv. Aragón de alfalfa, bajo dos ciclos de sequía (moderada, S1/R1) y (severa, S2/R2). La curva de respuesta de la tasa de fotosíntesis neta a la luz mostró una disminución en la capacidad fotosintética de saturación de luz y una reducción aparente en el rendimiento fotoquímico. Después del riego de recuperación, la fotosíntesis no se recuperó, mientras que la conductancia estomática sí lo hizo en las plantas moderadamente estresadas. La tasa calculada de transporte de electrones también disminuyó en plantas con estrés hídrico, pero después del riego de recuperación, las plantas moderadamente estresadas exhibieron una recuperación total. La comparación de las curvas de respuesta fotosintética del CO₂ intercelular entre las plantas bien irrigadas y las plantas bajo sequía condujo a la conclusión de que los efectos del déficit hídrico en el metabolismo del cloroplasto contribuyen significativamente a la inhibición de la fotosíntesis y una mayor implicación de

factores no estomáticos en la declinación de la fotosíntesis en plantas de alfalfa bajo ciclo de déficit hídrico (Antolín y Sánchez, 1993).

Evapotranspiración, transpiración y eficiencia transpiratoria

La evapotranspiración es el término que se utiliza para describir la cantidad de agua utilizada por el cultivo, agua que es evaporada a la atmosfera por el cultivo y consiste en dos componentes, transpiración y evaporación. La transpiración es el agua absorbida por las plantas que se evapora directamente de las hojas, mientras la evaporación es el agua que se pierde directamente de la superficie del suelo (Hanson *et al.*, 2007). En condiciones áridas en los Estados Unidos de América la alfalfa cultivada para forraje requiere de grandes cantidades de agua para una alta productividad; las variedades CUF 101, Moapa 69 y WL 318 produjeron un rendimiento promedio de 26.3 Mg ha⁻¹ con una evapotranspiración de 1000 mm y exhibieron una relación lineal positiva entre el rendimiento de materia seca y la evapotranspiración; la eficiencia en el uso del agua estimada en esta relación fue 23.1 Mg ha⁻¹ de materia seca por metro de agua utilizada como evapotranspiración del cultivo, valor comparable a otras especies de C₃ (Grimes *et al.*, 1992).

En relación con la eficiencia en el uso del agua o eficiencia transpiratoria en alfalfa se han realizado diversos estudios en los que se ha determinado que, en condiciones de campo, las plantas bajo estrés hídrico aumentan su eficiencia en el uso del agua en comparación con riego; la eficiencia en el uso del agua fue 3 kg m⁻³ con 100 % de riego y 1.17 kg m⁻³ con 25% de riego (Carter *et al.*, 2013).

Efecto de la sequía en el crecimiento del sistema radical

El crecimiento de la raíz bajo condiciones déficit hídrico es una característica de la planta que puede contribuir en gran medida a la tolerancia a sequía; el déficit hídrico puede afectar significativamente las características de la raíz y el tamaño de las células en la capa pilífera y el impacto del déficit hídrico depende de su intensidad en trigo duro (Adda *et al.*, 2005). Las raíces son más eficientes en la absorción de agua y nutrientes cuando su arquitectura es diseñada de acuerdo con su ambiente; las raíces profundas pueden extraer agua localizada debajo del suelo en secamiento y las raíces finas poco profundas pueden explotar los suelos en los que los nutrientes limitantes del crecimiento están retenidos cerca de la superficie del suelo (Gewin, 2010). El déficit hídrico del suelo afecta la absorción de agua por las raíces y el crecimiento de los brotes de la corona en alfalfa. Se determinó que los cambios en la conductividad hidráulica (L_{pr}) y morfología de la raíz bajo estrés por sequía regularon el intercambio de gases y la eficiencia del uso del agua en dos cultivares de alfalfa y un sorgo, dos cultivos con adaptaciones contrastantes a sequía; el primero exhibió un mecanismo de evitación a la sequía y el segundo un mecanismo de tolerancia a la sequía. Las plántulas se sometieron a estrés hídrico inducido con polietileno glicol (PEG-6000) y después se rehidrataron; se observó que la L_{pr} disminuyó rápidamente después del tratamiento con PEG, pero se recuperó en gran medida dentro de las 48 h posteriores a la rehidratación; sin embargo, las diferencias entre especies y cultivares fueron significativas. El cambio rápido en L_{pr} también condujo a cambios en el potencial hídrico de la hoja, en el intercambio de gases y en la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i) en ambas especies. Adicionalmente, el tratamiento con Hg^{2+} indicó que los cambios inducidos por el estrés hídrico en L_{pr} se debieron a la participación de las aquaporinas. Variedades de alfalfa y sorgo de un año sometidos a estrés por sequía moderado y severo a nivel de campo habían alterado la morfología de las raíces y reducido la producción de

biomasa y la disipación de agua, pero incrementaron la eficiencia del uso del agua (EUA). Estos cambios fueron dependientes del nivel de estrés, especies y cultivares. Sin embargo, no todos los cambios morfológicos de la raíz contribuyeron a mejorar el uso del agua. Por ejemplo, la disminución en la longitud de la raíz principal afectó negativamente la EUA en alfalfa, mientras que el aumento en el área de la superficie de la raíz se relacionó positivamente solo con la EUA del sorgo. La diferencia en la tolerancia a la sequía entre especies o cultivares está relacionada con su capacidad de recuperar la pérdida Lp_r y asimilación de CO_2 después de la rehidratación, así como la capacidad de regular eficazmente los cambios morfológicos de la raíz para aumentar la EUA (Li *et al.*, 2011).

Literatura citada

- Abid, M., E. Mansour, A. B. Khaled, Kh. D. Bachar, L. Ben Yahya and A. Ferchichi. 2016. Induced osmotic adjustment in alfalfa plants confers tolerance to water stress. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 22(3): 415-425.
- Adda, A., M. Sahnoune, M. Kaid-Harch and O. Merah. 2005. Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. *Comptes Rendus Biologies* 328: 918-927.
- Antolín, M. C., and M. Sánchez-Díaz. 1993. Effects of temporary Droughts on photosynthesis of alfalfa plants. *Journal of Experimental Botany* 44(265): 1341-1349.
- Barrios-Gómez, E.J., C. López-Castañeda y J. Kohashi-Shibata. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agronomía Costarricense* 35(1):131-145.
- Brown P. W., and C. B. Tanner. 1986. Alfalfa stem and leaf growth during water stress. *Agronomy Journal* 75: 798-805.
- Carter, C., A. Garcia y Garcia, M. A. Islam and K. Hansen. 2013. Effect of deficit irrigation on water use and water use efficiency of alfalfa. *ASABE Annual International Meeting Paper*. 1-14.
- Gewin, V. 2010. An underground revolution. *Nature* 466: 552-553.
- Grimes D. W., P. L. Wiley and W. R. Sheesley. 1992. Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. *Crop science* 32: 1381-1387.
- Gu, L., J. Chen, C. Xu, J. Kim, H. Chen, J. Xia and L. Zhang. 2019. *Science of the total environment* 684: 229-246.

- Hanson, B.R., K.M. Bali and B.L. Sanden. 2007. Irrigating alfalfa in arid regions. *In*: C.G. Summers and D.H. Putnam (eds.), *Irrigated alfalfa management in Mediterranean and Desert zones*. Chapter 16. Oakland: University of California Agriculture and Natural Resources Publication 8293. ([http://alfalfa.ucdavis.edu/Irrigated Alfalfa](http://alfalfa.ucdavis.edu/Irrigated%20Alfalfa)).
- Li, W., S. Zjang, L. Shan and A. E. Eneji. 2011. Changes in root characteristics, gas Exchange and water use efficiency following water stress and rehydration of alfalfa and sorghum. *Australian Journal of Crop Science* 5(12): 1521-1532.
- Peterson P. R., C. C. Sheaffer and M. H. Hall. 1992. Drought effects on perennial forage legume yield and Quality. *Agronomy Journal* 84: 774-779.
- Petcu, E., M. Schitea, L. Drăgan and N. Băbeanu. 2019. Physiological response of several alfalfa genotypes to drought stress. *Romanian Agricultural Research* 36: 107-118.

CAPÍTULO I. VARIABILIDAD GENÉTICA EN BIOMASA AÉREA Y SUS COMPONENTES, Y RESISTENCIA A SEQUÍA EN ALFALFA

1.1 INTRODUCCIÓN

La alfalfa es una especie forrajera que requiere altos volúmenes de agua para producir rendimientos satisfactorios de materia seca y por esta razón, generalmente se produce en regiones con disponibilidad de riego. Sin embargo, cuando la cantidad de lluvia disminuye por largos periodos de tiempo, se reduce la disponibilidad de agua para riego y sí, las condiciones de sequía se prolongan, la escasez de agua para riego es más severa, y los cultivos de alfalfa pueden experimentar condiciones de estrés hídrico, con la consecuente disminución del rendimiento de forraje (Lauriault *et al.*, 2009). La producción de forraje es afectada por el estrés hídrico, particularmente en ambientes de secano; en estas condiciones el estrés por sequía será más frecuente y severo en muchas áreas del mundo basado en estudios del clima (IPCC, 2007). El riego puede mitigar el efecto de la sequía, pero el recurso hídrico estará menos disponible, debido a las mayores demandas por el incremento de las poblaciones humanas. Por lo tanto, se requiere de manera urgente la obtención de nuevas variedades con resistencia a sequía y/o mayor eficiencia en el uso del agua.

La alfalfa es considerada una especie resistente a sequía, pero su rendimiento puede fluctuar apreciablemente bajo condiciones de déficit hídrico; en estas condiciones la alfalfa tiene algunas ventajas agronómicas en comparación con otros cultivos anuales, al poseer un sistema de raíces que le permite explorar capas del suelo más profundas, para absorber agua y tolerar en mayor grado la sequía (Petcu *et al.*, 2019); Huang *et al.* (2018) determinaron que las praderas de alfalfa de uno y seis años de edad, consumieron más agua hasta una profundidad de 100 cm y produjeron menor

biomasa aérea que las praderas de dos a cinco años de edad; las praderas de cuatro y cinco años extrajeron 10 % más humedad debajo de los 200 cm de profundidad, y las praderas de cuatro años fueron las que tuvieron el comportamiento óptimo con más alto rendimiento de biomasa aérea y menor consumo de agua, debido a una mejor cobertura del suelo y un sistema de raíces más profundas desde el tercer año de edad.

Las plantas responden al estrés hídrico a través de cambios en sus características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, anatómicas y procesos moleculares; con base a la experiencia, la selección en campo ha guiado a la búsqueda de tolerancia a sequía y mecanismos específicos como el aumento en la síntesis de moléculas osmoreguladoras y antioxidantes a través de la biotecnología (Shao *et al.*, 2008). Otro aspecto para mejorar el comportamiento de la planta bajo sequía, es incrementar la eficiencia en el uso del agua; una mayor eficiencia en el uso del agua bajo sequía está determinada, principalmente por características que reducen la transpiración y la evapotranspiración del cultivo; la producción de biomasa está ligada muy estrechamente con la transpiración, de tal forma que las características de la planta que controlan la transpiración, se consideran las más importantes para el mejoramiento del rendimiento bajo condiciones de sequía (Blum, 2009). El estudio de la tolerancia a sequía y la sobrevivencia de la planta hacen posible determinar el comportamiento del genotipo y la selección del material genético más apropiado entre los cultivares de alfalfa evaluados bajo condiciones de estrés hídrico (Bellague *et al.*, 2016).

El mejoramiento genético del rendimiento de forraje depende de la disponibilidad de germoplasma diverso y su utilización eficiente. La alfalfa está distribuida ampliamente en el mundo y crece en ambientes altamente contrastantes; esta adaptación geográfica extensiva promueve la variación genética y ofrece a los fitomejoradores, la posibilidad de utilizar poblaciones genéticas altamente diversas (Tucak *et al.*, 2009). En el análisis de la variación genética de una población de plantas de

una misma especie, la varianza genética aditiva es la más importante porque es la principal determinante de las propiedades genéticas observables en la población y de la respuesta de esta a la selección. La varianza aditiva es la única que puede estimarse directamente a partir de las observaciones hechas en la población y de esta forma puede utilizarse en la estimación de la heredabilidad que, a su vez, representa la confiabilidad del valor fenotípico como indicación del valor reproductivo que es lo que determina su influencia en siguiente generación (Falconer, 1984). La similitud observada para los valores de heredabilidad en las características medidas en las plantas en riego y sequía, es indicativo de que la utilización de aquellas características con más altos niveles de heredabilidad observadas en riego y sequía, pueden tener la misma efectividad en la selección de nuevas progenies independientemente del ambiente de selección.

El objetivo de esta investigación fue determinar el comportamiento de la biomasa aérea y sus componentes en condiciones de riego y sequía, y determinar la varianza fenotípica y sus componentes, y la heredabilidad en un grupo de variedades comerciales de alfalfa.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1 Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 29' N, 98° 53' O y altitud de 2250 msnm). El lugar se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo con verano fresco largo (Cb (wo) (w) (i')g), con 637 mm de precipitación media anual, porcentaje de lluvia invernal menor a 5%, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, y una oscilación térmica entre 5 y 7 ° (García, 2004).

1.2.2 Germoplasma

El germoplasma utilizado incluyó diez variedades comerciales de alfalfa (*Medicago sativa* L.). La semilla de las variedades San Miguel, Oaxaca, Atlixco, Aragón y Victoria se obtuvo de Casa Cobo S.A de C.V (Central de Abastos, Sección de Abarrotes Bodega A91, Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09040), y la semilla de Genex, Júpiter, Milenia y San Isidro, y Cuf 101, se obtuvo de El Semillero en Puebla S.A de C.V (Calle 12 Poniente # 312, Colonia Centro, Puebla, C.P. 72000) y La Semillería (Carretera Celaya-Querétaro, km 11.6, Colonia Los Ángeles Corregidora, Querétaro), respectivamente.

1.2.3 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones y dos tratamientos de humedad edáfica (riego y sequía). La unidad experimental consistió en una planta individual crecida en un tubo de PVC de 1 m de alto y 4” de diámetro, con una bolsa cilíndrica de polietileno de 1.1 m de alto y el mismo diámetro que el tubo de PVC. La siembra se realizó en cajas para almacigo, el día 15 de marzo de 2017, al colocar cinco semillas del mismo peso en cada celdilla; cuando las plántulas tuvieron 20 días después de la siembra (dds), se procedió a elegir la plántula más vigorosa en cada celdilla para su trasplante en los tubos de PVC. Los tubos de PVC se llenaron con suelo desecado al sol durante dos semanas; el suelo utilizado es de textura franco-arenosa con densidad aparente de 1.12 T m^{-3} , pH de 7.3, contenido de materia orgánica de 18.8 %, nitrógeno total de 0.22 %, fosforo de 176.3 mg kg^{-1} , potasio de 2420 mg kg^{-1} , capacidad de intercambio catiónico de $54.6 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, conductividad eléctrica de 0.53 dS m^{-1} , capacidad de campo (CC) de 52 % y porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) de 38.2 % (Laboratorio Central Universitario, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 2016). La

fertilización se hizo a los 44 días después del trasplante (ddt) con la dosis 60-140-00, al utilizar urea y superfosfato de calcio triple como fuentes de nitrógeno y fósforo; una segunda y tercera fertilización se hizo a los 240 y 420 ddt con la misma dosis. Los tratamientos de humedad edáfica fueron: riego, donde el contenido hídrico del suelo se mantuvo cercano a CC desde la fecha de trasplante (20 dds) hasta los 406 ddt (R_1) y desde los 406 ddt hasta la conclusión de experimento (688 ddt) (R_2), y sequía, donde la aplicación de agua se suspendió por un periodo de 61 días [345 a 406 ddt; marzo a mayo 2018; (S_1)] y un segundo periodo de 68 días [620-688 ddt; noviembre 2018 a febrero 2019; (S_2)].

1.2.4 Variables medidas y calculadas

Cuando las plantas alcanzaron su máximo desarrollo se procedió a realizar cortes programados cada cinco semanas en el periodo otoño-invierno y cada cuatro semanas en el periodo primavera-verano, excepto, en el corte de abril 2019 que se hizo ocho semanas después del corte anterior. Todos los cortes se hicieron a una altura de 5 cm sobre el nivel del suelo. En cada corte se midió la altura de planta (AP, cm) desde la superficie del suelo hasta la última hoja expuesta en el tallo más alto con una regla graduada a 5 mm; se contó el número total de tallos (NT) y se determinó la relación hoja:tallo (H:T) en una submuestra de cuatro tallos secundarios, al dividir el peso seco de las hojas (PSH) entre el peso seco del tallo (PST), obtenidos después de un periodo de secado de 48 h a una temperatura de 65 °C ($H:T = PSH / PST$).

El rendimiento de materia seca por planta (RMS, g) se calculó al sumar el peso seco de hojas y tallos secundarios de la submuestra utilizada para determinar la relación H:T, y el peso seco de las hojas y tallos secundarios de la muestra remanente de la planta. La eficiencia en el uso de la radiación (EUR, g MS MJ⁻¹) se calculó al dividir el RMS entre la radiación solar acumulada diariamente

(datos obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo), durante el periodo transcurrido entre cortes subsecuentes (Luna-Guerrero *et al.*, 2018).

1.2.5 Temperatura del invernadero

La temperatura máxima y mínima dentro del invernadero se obtuvieron con un termómetro de máximas y mínimas de columna de mercurio, marca Taylor modelo 5458P colocado junto a las plantas a una altura de 2 m sobre el nivel del piso. La temperatura máxima registrada durante el estudio varió de 19 a 40 °C y la mínima de -4 a 15 °C, con un promedio general de 32 y 8.5 °C, respectivamente.

1.2.6 Contenido de humedad del suelo

El contenido hídrico del suelo se determinó mediante el método gravimétrico cada tercer día con una balanza electrónica marca Tor-Rey, modelo PCR Series, agregando la cantidad de agua evapotranspirada en cada unidad experimental, para mantener el contenido de humedad edáfica cercano a CC en todas las plantas, excepto, durante los tratamientos de sequía (S₁ y S₂), en los que se suspendió la aplicación de agua y sólo se registró el peso de cada tubo, para estimar la evapotranspiración ocurrida en las plantas sujetas a déficit hídrico.

1.2.7 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron con el procedimiento GLM (SAS, 2012), versión para Windows 10, con un diseño completamente al azar. Las medias de los tratamientos de humedad edáfica y genotipos se compararon al utilizar la diferencia mínima significativa (DMS, $p < 0.05$), bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + G_j + T * G_{jj} + E_{ij}$$

donde, Y_{ij} es el valor de la variable de respuesta, μ es la media general, T_i representa los tratamientos de humedad del suelo, G_j representa los genotipos, T^*G_{ij} representa la interacción entre los tratamientos de humedad edáfica y los genotipos, y E_{ij} es el error experimental (Hinkelmann y Kempthorne, 2008).

1.2.8 Estimación de la varianza fenotípica y sus componentes, y la heredabilidad

La varianza fenotípica (σ_f^2) y sus componentes se estimaron para las variables medidas en todos los cortes en riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2), bajo el modelo estadístico propuesto por Molina (1992) y Márquez-Sánchez y Sahagún-Castellanos (1994):

$$Y_{ijk} = \mu + FC_i + R(FC)_{ij} + G_k + G^*FC_{ik} + E_{ijk}$$

donde, Y_{ijk} es el valor de la variable de respuesta, μ es la media general, FC_i es el efecto de la fecha de corte, $R(FC)_{ij}$ es el efecto de las repeticiones dentro de la fecha de corte, G_k es el efecto de los genotipos; G^*FC_{ik} es el efecto de la interacción entre los genotipos y las fechas de corte y E_{ijk} es el error experimental. Así, la varianza fenotípica y sus componentes ($\sigma_f^2 = \sigma_A^2 + \sigma_e^2 + \sigma_{g*fc}^2$), varianza aditiva ($\sigma_A^2 = (M_1 - M_2)/r*f$), varianza ambiental ($\sigma_e^2 = M_3$), varianza de la interacción de genotipos*fechas de corte ($\sigma_{g*fc}^2 = (M_2 - M_3)/r$), y la heredabilidad en sentido estricto ($h^2 = (\sigma_A^2) / (\sigma_f^2)$), se calcularon a partir de los valores de las esperanzas de los cuadrados medios del análisis de varianza fenotípica y sus componentes (Cuadro 2.1). Las estimaciones de la varianza fenotípica y sus componentes se hicieron bajo el supuesto de equilibrio de Hardy-Weinberg, equilibrio de ligamiento y ausencia de epistasia (Molina, 1992; Melendres-Martínez *et al.*, 2018).

Cuadro 3.1. Análisis de varianza fenotípica y sus componentes para 10 variedades de alfalfa evaluadas en diferentes fechas de corte (fc) y en riego (R₁ y R₂) y sequía (S₁ y S₂).

Fuente de variación	GL	CM	E (CM)
Fechas de corte	fc-1	-	-
Repeticiones(Fechas de corte)	fc (r-1)	-	-
Genotipos	(g-1)	M ₁	$\sigma_e^2 + r\sigma_{fcg}^2 + rc\sigma_g^2$
Genotipos x Fechas de corte	(g-1)(fc-1)	M ₂	$\sigma_e^2 + r\sigma_{fcg}^2$
Error	fc (g-1)(r-1)	M ₃	σ_e^2

GL=Grados de libertad; CM=Cuadrados medios; E(CM)=Esperanza de los cuadrados medios.

La varianza de dominancia se estimó de acuerdo con las fórmulas propuestas por Molina (1992), al utilizar la varianza aditiva (σ_A) entre familias de medios hermanos (Galicia, 2012):

$$\sigma_G^2 = \frac{3}{4}\sigma_A^2 + \sigma_D^2 \text{ y } \sigma_A^2 = \frac{1}{4}\sigma_G^2$$

Al despejar la varianza de dominancia se obtiene:

$$\sigma_D^2 = \frac{1}{4}\sigma_A^2$$

La heredabilidad en sentido estrecho (h^2) se calculó bajo el supuesto de que el grupo de variedades utilizadas es una muestra aleatoria y representativa de la variabilidad genética de la alfalfa, y considerando que esta es una especie alógama (Molina, 1992). De esta forma, el componente de varianza obtenido de la esperanza matemática del cuadrado medio del factor variedades es un estimador de la varianza aditiva (Hill *et al.*, 1998).

$$(h^2 = \sigma_A^2 / \sigma_f^2)$$

La heredabilidad en sentido amplio ($h^2 = \sigma_G^2 / \sigma_f^2$) mide la contribución del genotipo a la varianza fenotípica total (σ_f^2); teóricamente puede variar en un rango de cero, cuando no hay variación genética presente a 1, cuando toda la variación observada es genotípica en origen. Una distinción

debe hacerse entre la heredabilidad en sentido amplio ($h^2 = \sigma_G^2 / \sigma_f^2$) y la heredabilidad en sentido estrecho ($h^2 = \sigma_A^2 / \sigma_f^2$) que es el cociente entre la varianza aditiva y la varianza fenotípica (Hill *et al.*, 1998).

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1 Contenido hídrico del suelo

En riego (R₁ y R₂) el contenido hídrico del suelo se mantuvo cercano a CC durante el experimento, mientras en sequía (S₁ y S₂), la disponibilidad de humedad edáfica disminuyó por debajo del PMP de los 361 a 407 ddt en S₁ y de los 634 a 687 ddt en S₂, y se mantuvo en esa condición durante más tiempo en S₂ (53 d) que en S₁ (46 d) (Figura 3.1). Una disminución severa en el contenido de humedad en el suelo por debajo del límite de absorción de las raíces (PMP), puede afectar considerablemente la morfología, fisiología y rendimiento de la alfalfa (Pembleton *et al.*, 2009). Sin embargo, la deshidratación de la planta puede retardarse por medio de un periodo de absorción más prolongado o una reducción de la transpiración; cuando el crecimiento de la raíz y la absorción se detienen en un suelo en secamiento, la alfalfa puede mantener el déficit hídrico al reducir (Erice *et al.*, 2010) y entonces, detener su crecimiento vegetativo (Sheaffer *et al.*, 1988).

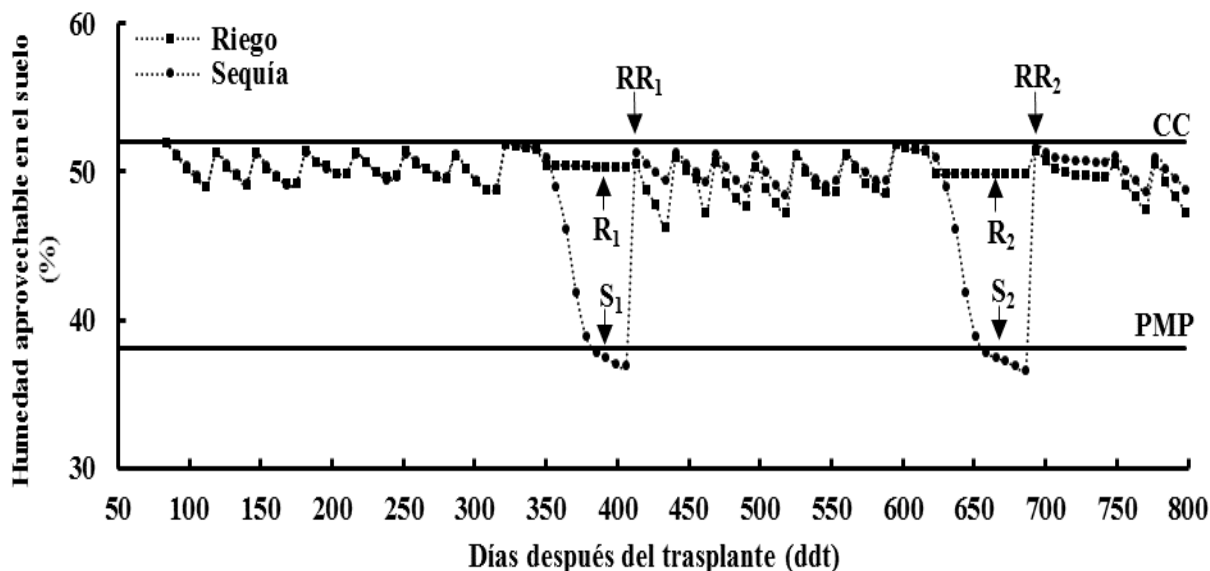


Figura 3.1. Contenido hídrico del suelo en los tratamientos de riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2) durante el experimento, en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC=Capacidad de campo y PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente. RR₁=Riego de recuperación 1; RR₂=Riego de recuperación 2.

1.3.2 Análisis estadístico

En el primer periodo de déficit hídrico del suelo, en el que la aplicación de agua se suspendió por 61 días (S_1 , 345 a 406 ddt), el análisis de varianza detectó diferencias ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad edáfica (riego, R_1 vs. sequía, S_1) para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hojas (RMSH), relación H:T (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) solamente a los 406 y 434 ddt. La variabilidad entre genotipos fue significativa ($p \leq 0.01$) para el RMST, relación H:T, AP y EUR desde los 112 a los 434 ddt; el RMSH mostró diferencias ($p \leq 0.01$) entre genotipos a los 112, 140, 175, 210, 280 y 315 ddt, y el NT mostró diferencias ($p \leq 0.01$) a los 112, 175, 210, 245, 280, 315 y 434 ddt, y diferencias ($p \leq 0.05$) a los 406 ddt. La interacción tratamientos de humedad del suelo*genotipos mostró significancia ($p \leq 0.01$) a los 112, 140, 210, 406 y 434 ddt para el RMST; 112, 140 y 210 ddt para el RMSH; 112-434 ddt para H:T; 112, 245 y 280 ddt para AP; 175, 315 y 434 ddt para NT, y 140 y 210 ddt para EUR; y diferencias ($p \leq 0.05$) a los 175, 315 y 434 ddt para

el RMST; 175 ddt para RMSH; 140, 210, 315 y 406 ddt para AP; 140 y 245 ddt para NT, y 112, 175, 315 y 434 ddt para EUR (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hojas (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR), determinados en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en 10 variedades de alfalfa en riego (R₁) y sequía (S₁) en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

FV	GL	Días después del trasplantar (ddt)								
		112	140	175	210	245	280	315	406	434
RMST (g MS planta⁻¹)										
A	1	0.3ns	0.5ns	0.2ns	0.3ns	0.3ns	0.3ns	0.8ns	2280.9**	910.5**
B	9	5.9**	2.9**	6.6**	5.5**	4.4**	8.6**	10.8**	5.5**	9.2**
A*B	9	2.1**	1.2**	1.4*	0.7**	0.5ns	0.7ns	2.0*	3.6**	4.0*
Error	60	0.6	0.2	0.5	0.3	0.6	0.8	0.9	1.2	1.6
RMSH (g MS planta⁻¹)										
A	1	0.02ns	0.1ns	0.001ns	0.1ns	0.1ns	0.1ns	0.1ns	275.8**	154.6**
B	9	0.6**	0.3**	0.4**	0.5**	0.2ns	0.6**	0.9**	0.4ns	1.2ns
A*B	9	0.3**	0.2**	0.3*	0.1**	0.1ns	0.1ns	0.2ns	0.3ns	0.8ns
Error	60	0.1	0.03	0.1	0.04	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6
Relación H:T										
A	1	0.001ns	0.00002ns	0.002ns	0.0004ns	0.001ns	0.0003ns	0.00002ns	0.63**	0.14**
B	9	0.02**	0.018**	0.095**	0.02**	0.14**	0.065**	0.036**	0.082**	0.06**
A*B	9	0.01**	0.006**	0.006**	0.01**	0.02**	0.012**	0.01**	0.034**	0.02**
Error	60	0.0004	0.0004	0.001	0.0004	0.01	0.0005	0.001	0.002	0.006
AP (cm)										
A	1	23.1ns	21.0ns	40.6ns	9.1ns	64.8ns	21.0ns	27.6ns	21153.5**	1294.0**
B	9	384.1**	112.5**	373.5**	301.1**	765.4**	564.2**	439.1**	240.4**	477.3**
A*B	9	132.0**	31.5*	34.2ns	53.1*	185.7**	129.9**	43.4*	190.8*	93.8ns
Error	60	19.3	11.9	23.9	23.0	34.6	20.2	17.4	72.7	94.2
NT										
A	1	3.2ns	0.5ns	0.1ns	1.3ns	0.3ns	5.0ns	0.1ns	4813.7**	749**
B	9	18.8**	2.2ns	24.5**	52.3**	99.7**	40.4**	23.0**	66.7*	88.2**
A*B	9	4.1ns	3.4*	10.6**	9.9ns	13.4*	4.5ns	10.5**	14.7ns	35.4**
Error	60	2.9	1.6	3.1	4.9	5.3	3.7	2.6	28.9	7.7
EUR (g MS MJ⁻¹)										
A	1	0.002ns	0.01ns	0.002ns	0.004ns	0.003ns	0.01ns	0.01ns	3.22**	10.2**
B	9	0.05**	0.04**	0.07**	0.07**	0.06**	0.1**	0.13**	0.03**	0.1**
A*B	9	0.02*	0.02**	0.01*	0.01**	0.01ns	0.01ns	0.03*	0.01ns	0.04*
Error	60	0.01	0.002	0.01	0.003	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

A=Tratamientos de humedad edáfica (Riego=R₁ y Sequía=S₁); B=Genotipos; A*B Interacción humedad*genotipos; *(p≤0.05); ***(p≤0.01); ns (no significativo).

En el segundo periodo de sequía, en el que el riego se suspendió por un periodo de 68 días (S_2 , 620-688 ddt), el análisis de varianza detectó diferencias ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad edáfica (riego, R_2 vs. sequía, S_2), para RMST, RMSH, NT y EUR desde los 406 hasta los 798 ddt. La relación H:T y la altura de planta sólo mostraron diferencias ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad edáfica a los 462, 490 y 686 ddt, y 462, 686, 742, 770 y 798 ddt, respectivamente. La variabilidad entre genotipos fue significativa ($p \leq 0.01$) para el RMST, relación H:T, AP, NT y EUR desde los 462 hasta los 798 ddt, mientras la variabilidad entre genotipos para el RMSH fue significativa en todos los cortes, excepto, a los 588 ddt. La interacción tratamientos de humedad edáfica*genotipos mostró significancia ($p \leq 0.01$) para RMST, RMSH y EUR a los 742 y 770 ddt; la relación H:T mostró significancia ($p \leq 0.01$) a los 490, 686, 770 y 798, y significancia ($p \leq 0.05$) a los 588 ddt; la AP exhibió significancia ($p \leq 0.01$) a los 490, 742 y 798 ddt, mientras el NT mostró significancia ($p \leq 0.05$) a los 462, 518 y 686 ddt (Cuadro 3.3). Anower *et al.* (2017) al estudiar el comportamiento de 11 variedades de alfalfa bajo condiciones de riego y tres diferentes niveles de sequía en invernadero con tubos cónicos, observaron que en riego hubo diferencias significativas entre variedades para el RMST y sus componentes, pero en condiciones de déficit hídrico, además de haber diferencias entre variedades, se redujo la producción de biomasa aérea, peso seco de raíces, tasa de transpiración, tasa de elongación del tallo, tasa relativa de crecimiento, índice de contenido de clorofila, contenido relativo de agua en la célula y diámetro de las raíces; la eficiencia en el uso del agua aumentó ligeramente en los tratamientos con déficit hídrico.

Cuadro 3.3. Fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hojas (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR), determinados en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en 10 variedades de alfalfa en riego (R₂) y sequía (S₂) en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

FV	GL	Días después del trasplantar (ddt)								
		462	490	518	553	588	686	742	770	798
RMST (g MS planta⁻¹)										
A	1	178.4**	254.8**	275.2**	50.4**	84.2**	4508.8**	469.2**	108.4**	101.2**
B	9	5.1**	7.1**	7.0**	9.3**	2.1**	52.9**	27.2**	9.4**	5.0**
A*B	9	0.9ns	1.8ns	1.2ns	2.5ns	0.7ns	20.7ns	9.6**	2.3*	1.1ns
Error	60	0.95	1.4	1.5	1.2	0.6	10.9	1.9	0.8	0.7
RMSH (g MS planta⁻¹)										
A	1	25.5**	33.4**	43.6**	7.4**	13.2**	464.8**	60.5**	15.3**	14.3**
B	9	0.7**	0.6*	0.7**	0.6ns	0.2ns	6.6*	2.8**	1.0**	0.7**
A*B	9	0.2ns	0.4ns	0.2ns	0.6ns	0.2ns	2.4ns	1.2*	0.6*	0.2ns
Error	60	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	2.2	0.5	0.2	0.1
Relación H:T										
A	1	0.08**	0.03**	0.0004ns	0.005ns	0.001ns	0.24**	0.013ns	0.001ns	0.0003ns
B	9	0.05**	0.03**	0.03**	0.07**	0.02**	0.03**	0.07**	0.09**	0.035**
A*B	9	0.001ns	0.01**	0.002ns	0.02ns	0.006*	0.01**	0.03ns	0.03**	0.017**
Error	60	0.004	0.002	0.002	0.01	0.002	0.003	0.02	0.01	0.005
AP (cm)										
A	1	254.6**	76.5ns	14.5ns	92.7ns	48.6ns	50124.7**	1122.2**	1901.8**	428.3**
B	9	163.5**	83.9**	263.8**	548.5**	357.6**	353.2**	328.9**	288.5**	116.4**
A*B	9	38.4ns	68.7**	5.3ns	57.3ns	22.1ns	128.9ns	69.5**	32.2ns	39.0**
Error	60	20.6	24.3	37.1	37.9	26.7	70.2	22.3	61.9	12.9
NT										
A	1	664.6**	182.5**	194.1**	246.5**	210.0**	5989.5**	1044.5**	468.1**	369.5**
B	9	38.2**	40.1**	35.5**	46.5**	56.8**	116.2**	61.5**	63.6**	30.7**
A*B	9	19.2*	4.7ns	13.6*	14.5ns	12.1ns	42.0*	17.9ns	9.2ns	5.9ns
Error	60	7.3	6.4	5.8	10.6	7.1	15.5	12.1	5.8	2.9
EUR (g MS MJ⁻¹)										
A	1	1.6**	3.3**	2.7**	0.6**	1.09**	7.2**	1.53**	0.95**	1.1**
B	9	0.05**	0.09**	0.07**	0.12**	0.03**	0.08**	0.09**	0.08**	0.06**
A*B	9	0.01ns	0.02ns	0.01ns	0.03ns	0.01ns	0.03ns	0.03**	0.02*	0.01ns
Error	60	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01

A=Tratamientos de humedad edáfica (Riego=R₂ y Sequía=S₂); B=Genotipos; A*B Interacción humedad*genotipos; *(p<0.05); **(p<0.01); ns (no significativo).

1.3.3 Varianza fenotípica y sus componentes, y heredabilidad

La varianza fenotípica para el rendimiento total de materia seca, rendimiento de materia seca de hojas, relación H:T, altura de planta, número de tallos y eficiencia en el uso de la radiación en riego (R_1 y R_2) fue mayor ($p \leq 0.05$) que en sequía (S_1 y S_2). La varianza fenotípica para el rendimiento total de materia seca y sus componentes morfológicos fue mayor ($p \leq 0.05$) que los demás componentes de varianza en riego y sequía. No obstante, la varianza ambiental contribuyó en mayor proporción ($p \leq 0.05$) a la varianza fenotípica, que la varianza genotípica en ambos riego y sequía. La varianza genética aditiva fue mayor ($p \leq 0.05$) que la varianza genética de dominancia para todos los caracteres medidos en las plantas en riego y sequía. La varianza de la interacción fue menor que las varianzas fenotípica, ambiental y genética aditiva, para todos los caracteres medidos en las plantas en riego y sequía (Cuadro 3.4). Riday y Brummer (2007) hicieron esta misma observación al estimar los componentes de varianza en alfalfa autotetraploide, donde la varianza de dominancia fue mucho menor que la varianza aditiva para el rendimiento de materia seca y sus componentes. Así mismo, Bowley y Christie (1981) determinaron que las estimaciones de varianza aditiva fueron significativamente mayores de cero, en una población de líneas F_1 de alfalfa, en condiciones controladas de crecimiento y que la varianza genética para el rendimiento de materia seca fue principalmente aditiva.

La heredabilidad en sentido estricto de las características medidas en las plantas fue de baja para el rendimiento de materia seca de hojas a moderada para rendimiento total de materia seca, relación H:T, altura de planta, número de tallos y eficiencia en el uso de la radiación en riego y sequía (Cuadro 2.4). Estos valores de heredabilidad son similares a los obtenidos para la biomasa aérea y altura de planta en alfalfa anual (*Medicago sativa* subesp. *falcata*) en condiciones de campo (Riday

y Brummer, 2007) y podrían ser útiles en el mejoramiento del rendimiento de materia seca de la alfalfa con el apoyo de la selección genómica (Annicchiarico, 2015).

Cuadro 3.4. Parámetros genéticos estimados para el rendimiento de materia seca total (RMST), rendimiento de materia seca de hoja (RMSH), relación hoja:tallo (H:T), altura de planta (AP), número de tallos (NT) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en riego (R₁ y R₂) y sequía (S₁ y S₂), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Parámetros genéticos	RMST	RMSH	H:T	AP	NT	EUR
Riego R₁ y R₂						
Varianza fenotípica (σ_f^2)	3.6 (0.7)	0.5 (0.1)	0.01 (0.001)	86.4 (7.6)	16.0 (1.6)	0.021 (0.001)
Varianza genotípica (σ_g^2)						
aditiva (σ_A^2)	1.2 (0.4)	0.1 (0.05)	0.005 (0.0003)	31.6 (1.2)	4.5 (0.8)	0.01 (0.001)
dominante (σ_D^2)	0.3	0.02	0.001	7.9	1.1	0.002
interacción (σ_{g*fc}^2)	0.7	0.06	0.002	12.3	2.5	0.002
Varianza ambiental (σ_e^2)	1.7 (0.4)	0.4 (0.08)	0.004 (0.0008)	42.6 (6.9)	9.0 (1.6)	0.01 (0.001)
Heredabilidad (H^2)	0.3 (0.04)	0.2 (0.04)	0.4 (0.04)	0.4 (0.03)	0.3 (0.04)	0.4 (0.04)
Sequía S₁ y S₂						
Varianza fenotípica (σ_f^2)	1.5 (0.2)	0.2 (0.03)	0.01 (0.001)	61.6 (5.8)	11.5 (0.8)	0.015 (0.007)
Varianza genotípica (σ_g^2)						
aditiva (σ_A^2)	0.5 (0.02)	0.04 (0.004)	0.004 (0.0003)	20.4 (2.0)	4.1 (0.3)	0.046 (0.005)
dominante (σ_D^2)	0.1	0.01	0.001	5.1	1.0	0.001
interacción (σ_{g*fc}^2)	0.2	0.04	0.004	13.7	1.8	0.002
Varianza ambiental (σ_e^2)	0.8 (0.2)	0.1 (0.03)	0.001 (0.0003)	27.5 (4.9)	5.5 (0.8)	0.008 (0.2)
Heredabilidad (H^2)	0.3 (0.04)	0.2 (0.04)	0.4 (0.03)	0.3 (0.04)	0.4 (0.04)	0.3 (0.04)

Desviación estándar entre paréntesis.

1.3.4 Biomasa aérea y sus componentes

1.3.4.1 Comportamiento de las variedades en riego (R₁ y R₂)

En riego (R₁) se determinó que las variedades Genex, Atlxco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia mostraron mayor RMST que las demás variedades a los 112, 140, 175, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt; 140, 315 y 406 ddt; 112, 140, 210 y 406 ddt; 140 y 245 ddt; 140 ddt; y 140 ddt. El RMST de las variedades Genex, Atlxco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Cuf 101 fue similar al de las variedades antes indicadas a los 210 ddt; 112, 245, 280 y 434 ddt; 315 y 434 ddt; 112 y 280 ddt; 112, 280 y 406 ddt; 315 ddt; 140 ddt; y 112 ddt (Figura 3.2a; Cuadro A1). Las

variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Victoria produjeron mayor RMSH que las otras variedades a los 112, 140, 175 y 315 ddt; 140 y 315 ddt; 140 y 210 ddt; 140 ddt; 140 ddt; 140 ddt; y 140 ddt; las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria, Aragón y San Isidro mostraron un RMSH similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Victoria a los 210 ddt; 210 ddt; 112 ddt; 112 ddt; 315 ddt; 210 ddt; y 140 ddt (Figura 3.2b; Cuadro A3). Las variedades Victoria, Aragón y San Isidro exhibieron mayor relación H:T que las demás variedades a los 245 ddt; 406 ddt; y 112, 140, 175, 210, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt. Las variedades Milenia y Aragón mostraron una relación H:T similar a Victoria, Aragón y San Isidro a los 406 ddt; y 434 ddt (Figura 3.2c; Cuadro A5). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 tuvieron mayor AP que las otras variedades a los 112, 175, 280 y 434 ddt; 175, 280 y 434 ddt; 112, 210, 280, 406 y 434 ddt; 245, 280 y 434 ddt; 112 y 280 ddt; 112, 140, 175, 210, 280, 315 y 434 ddt; y 112 y 280 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Victoria, Cuf 101 y Aragón tuvieron una AP similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 (Figura 3.2d; Cuadro A7). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Victoria y San Isidro tuvieron mayor NT que las otras variedades a los 112, 175, 245, 280 y 315 ddt; 245 y 315 ddt; 112 y 245 ddt; 245 ddt; 175, 210 y 434 ddt; 315 ddt; y 140 ddt. Las variedades Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Cuf 101, Aragón y San Isidro mostraron un NT similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Victoria y San Isidro a los 112, 175 y 210 ddt; 175 ddt; 112 y 175 ddt; 112, 140 y 245 ddt; 175 y 315 ddt; 175 ddt; y 315 ddt (Figura 3.2e; Cuadro A9). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia mostraron mayor EUR que las demás variedades a los 112, 140, 175, 245, 280, 35 y 434 ddt; 140 y 315 ddt; 112, 140, 210, 315 y 406 ddt; 140, y 245 ddt; y 140 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Cuf 101 tuvieron una EUR similar a las variedades Genex,

Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 210 ddt; 112, 245, 280, 406 y 434 ddt; 434 ddt, 112 y 280 ddt; 112 y 280 ddt; 315 ddt; 140 ddt, y 112 ddt (Figura 3.2f; Cuadro A11).

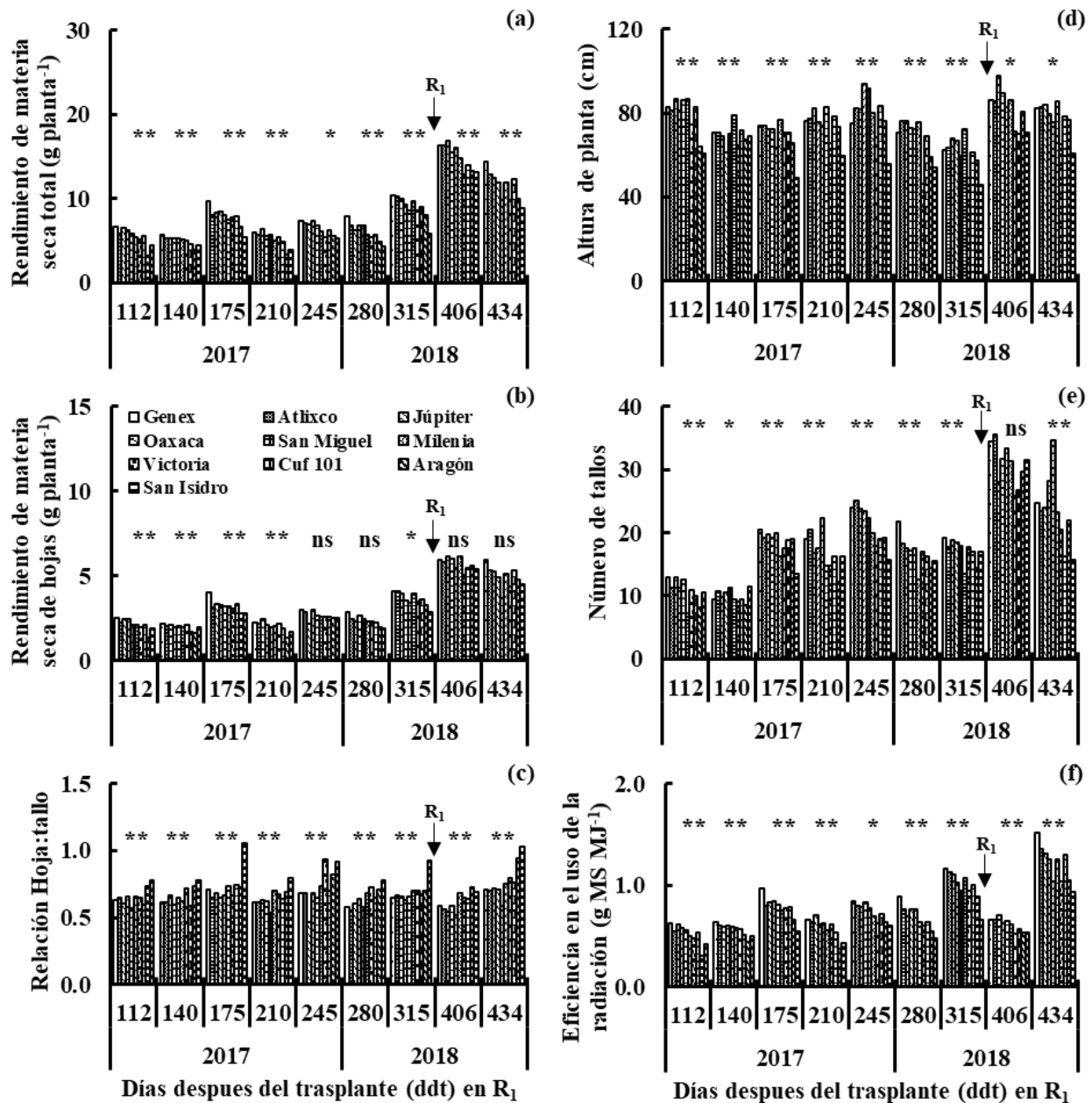


Figura 3.2. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en riego (R_1), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

En R₂ las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia exhibieron mayor RMST que las otras variedades a los 462, 490, 553, 686, 770 y 798 ddt; 462, 490, 518, 588 y 742 ddt; 490 y 553 ddt; y 462 y 490 ddt. Las variedades Genex, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Cuf 101 y Aragón produjeron RMST similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia a los 462, 518, 588 y 742 ddt; 686, 742 y 798 ddt; 490, 553, 588, 742 y 770 ddt; 490 y 553 ddt; 588 y 742 ddt; 742 ddt; y 490 ddt (Figura 3.3a; Cuadro A1). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Cuf 101 mostraron mayor RMSH que las otras variedades a los 686, 742, 770 y 798 ddt; 742 ddt; 798 ddt; 742 y 770 ddt; 490 y 742 ddt; y 742 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia, Victoria y Aragón exhibieron un RMSH similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Cuf 101 a los 490 ddt; 490 y 798 ddt; 490, 686 y 742 ddt; 742 ddt; 686 y 770 ddt; 798 ddt; y 490 ddt (Figura 3.3b; Cuadro A3). Las variedades Aragón y San Isidro mostraron mayor relación H:T que las demás variedades a los 553 ddt y 462, 490, 518, 553, 588, 686, 742, 770 y 798 ddt. Las variedades Milenia, Victoria y Aragón tuvieron una relación H:T similar a las variedades Aragón y San Isidro a los 553 ddt; 553 y 686 ddt; y 490 y 686 ddt (Figura 3.3c; Cuadro A5). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Victoria mostraron mayor AP que las otras variedades a los 770 ddt; 518, 588, 686 y 770 ddt, 553 y 770 ddt, 553, 742 y 798 ddt, 462 ddt; y 490 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia tuvieron una AP similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Victoria a los 798 ddt; 490 y 742 ddt, 462 ddt; 518 y 686 ddt; y 490, 518, 553, 588, 686 y 770 ddt (Figura 3.3d; Cuadro A7). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria, Cuf 101 y San Isidro mostraron mayor NT que las demás variedades a los 518, 588, 686, 742 y 798 ddt; 490, 518, 588, 686 y 798 ddt, 518 y 686 ddt; 518, 686 y 770 ddt; 462, 518 y 686 ddt; 686 ddt; 518 y 686 ddt; 518 ddt, 518 ddt; y 686 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Victoria y Cuf 101 tuvieron un NT similar a las variedades Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter,

Oaxaca, Milenia y Victoria a los 462 ddt; 742 ddt; 588 y 798 ddt; 462, 490, 588 y 798 ddt; 490 y 798 ddt; 588 ddt; y 588 ddt (Figura 3.3e; Cuadro A9). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia tuvieron mayor EUR que las demás variedades a los 490, 553, 686, 770 y 798 ddt, 462, 490, 518, 588 y 742; 490 y 5563 ddt; y 462 y 490 ddt. Las variedades Genex, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 mostraron una EUR similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia a los 462, 518, 588 y 742 ddt; 462, 686, 742 y 798 ddt; 490 ddt, 742 y 770 ddt; 490 y 553 ddt; 588 ddt; y 742 ddt (Figura 3.3f; Cuadro A11).

En riego (R_1 y R_2), el RMST y sus componentes RMSH, relación H:T, AP, NT y EUR variaron grandemente entre las distintas variedades; Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia mostraron mayor RMST, RMSH, AP, NT y EUR que las demás variedades; además, las variedades Aragón y San Isidro tuvieron mayor relación H.T que las otras variedades. Otros estudios en condiciones de invernadero con riego mostraron que las variedades BCB, ALF y AFR entre un grupo de 11 cultivares de alfalfa, mostraron el más alto RMST, materia seca de raíces, tasa de elongación del tallo, contenido relativo de agua y diámetro de raíces que las otras variedades de alfalfa (Anower *et al.*, 2017). La variedad de alfalfa Gold Queen (variedad Americana de alfalfa, tolerante a salinidad y suelos alcalinos) tuvo mejor comportamiento que la variedad Suntory (variedad Francesa de alto rendimiento y calidad con resistencia a enfermedades) en condiciones de campo con riego, en Horqin Banner, cerca de la región Mongol Autónoma de China; esta variedad también mostró mayor contenido de proteína cruda y carbohidratos hidrosolubles que la variedad Suntory (Liu *et al.*, 2018). En otro estudio conducido con 74 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero, en macetas en Rumanía, se determinó que las variedades con mayor RMST también mostraron mayor AP (F 1412-02, F 1535-03, Roxana y F 2007-08) y NT (F 1414-02, F 1711-05, F 1715-05 y F 2010-08) que las demás variedades (Petcu *et al.*, 2019).

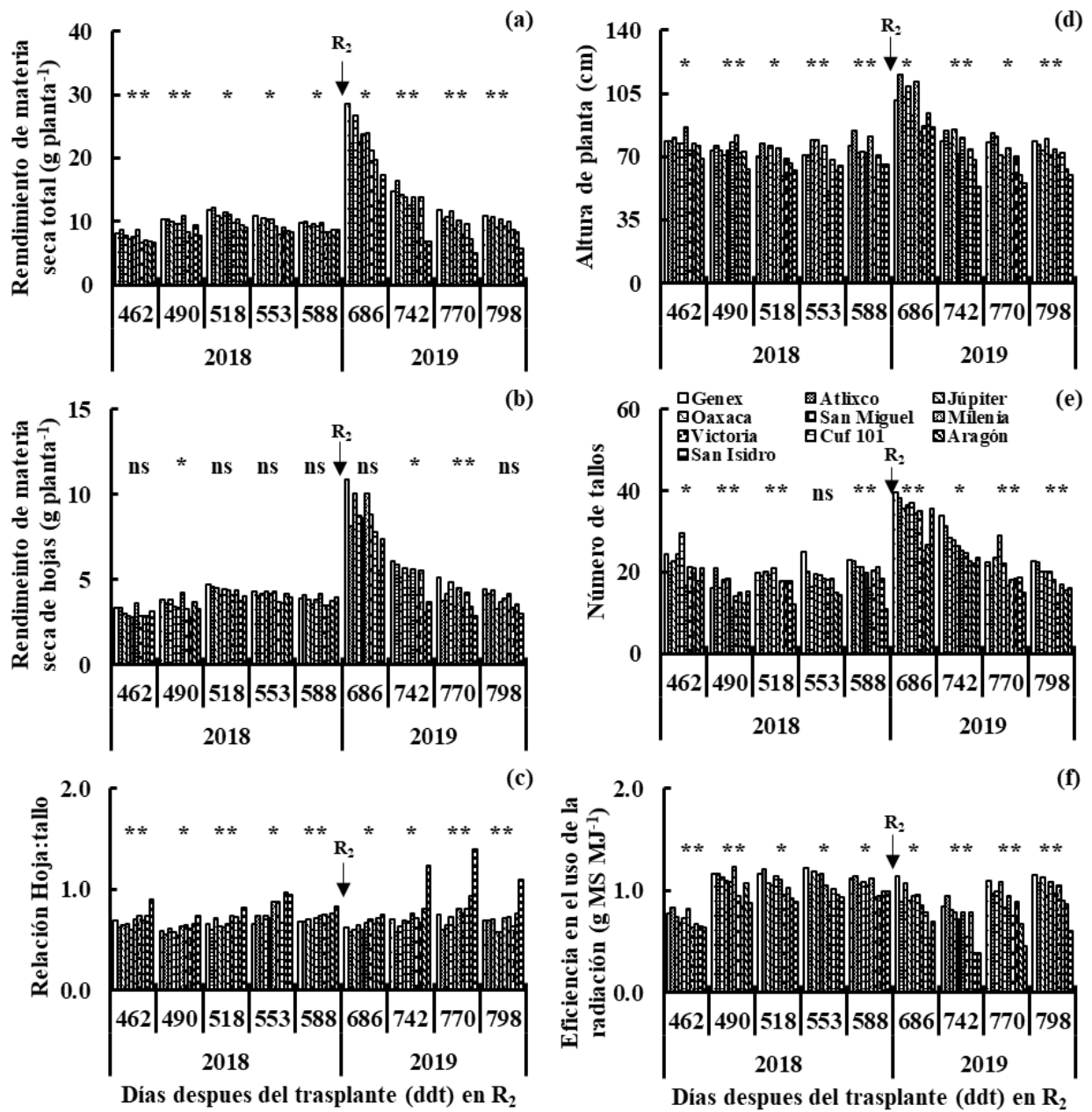


Figura 3.3. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), en nueve cortes de la parte aérea de la planta en riego (R₂), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

1.3.4.2 Comportamiento de las variedades en sequía (S₁ y S₂)

En S₁ las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia produjeron mayor RMST que las demás variedades a los 112, 140, 210, 280, 406 y 434 ddt; 210, 245, 280, 315 y 434 ddt; 112, 175, 210 y 280 ddt; 210 y 280 ddt; 175, 210 y 280 ddt; y 434 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Victoria exhibieron un RMST similar a las variedades las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 175 ddt; 112, 175 y 406 ddt; 315 ddt; 175 y 315 ddt, 434 ddt; y 280 ddt (Figura 3.4a; Cuadro A2). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia y Aragón mostraron mayor RMSH que las otras variedades a los 112 y 140 ddt; 245 y 315 ddt; 112 y 315 ddt, 280 ddt; 434 ddt; y 245 y 406 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Aragón tuvieron un RMSH similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia y Aragón a los 210, 280, 315 y 406 ddt; 112, 140, 280 y 434 ddt; 245 y 315 ddt; 112 y 434 ddt; 112 ddt; 112 y 315 ddt; y 112 ddt (Figura 3.4b; Cuadro A4). Las variedades Milenia, Victoria, Cuf 101, Aragón y San Isidro tuvieron mayor relación H:T que las otras variedades a los 315 ddt; 210 ddt, 315 ddt; 140 y 406 ddt; y 112, 140, 175, 245, 280, 315 y 434 ddt. La variedad Milenia tuvo una relación H:T similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia y Aragón a los 140 ddt (Figura 3.4c; Cuadro A6). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia exhibieron mayor AP que las otras variedades a los 140 dds; 245 y 406 dds; 140 y 280 ddt; 112, 175 y 210 ddt; y 140, 315 y 434 ddt. Las variedades Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Victoria tuvieron una AP similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia a los 140 y 175 ddt; 112, 175 y 210 ddt; 434 ddt; y 140 y 406 ddt (Figura 3.4d; Cuadro A8). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y San Miguel produjeron mayor NT que las demás variedades a los 140 ddt; 175, 210, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt; 112 y 315 ddt; y 315 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia

produjeron un NT similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y San Miguel a los 112, 210, 280, 315 y 406 ddt; 140 ddt; 434 ddt; 175, 210 y 406 ddt; 280 y 406 ddt; y 175 ddt (Figura 3.4e; Cuadro A10). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia mostraron mayor EUR que las otras variedades a los 140, 210, 280, 315, 406 y 434 ddt; 210, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt; 112, 210, 280, y 406 ddt; 210 y 315 ddt; 175, 210 y 280 ddt; y 434 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Aragón tuvieron una EUR similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 112 y 175 ddt; 175 ddt; 175, 315 y 434 ddt, 175 y 315 ddt; 406 y 434 ddt; 406 ddt; 280 ddt; y 406 ddt (Figura 3.4f; Cuadro A12).

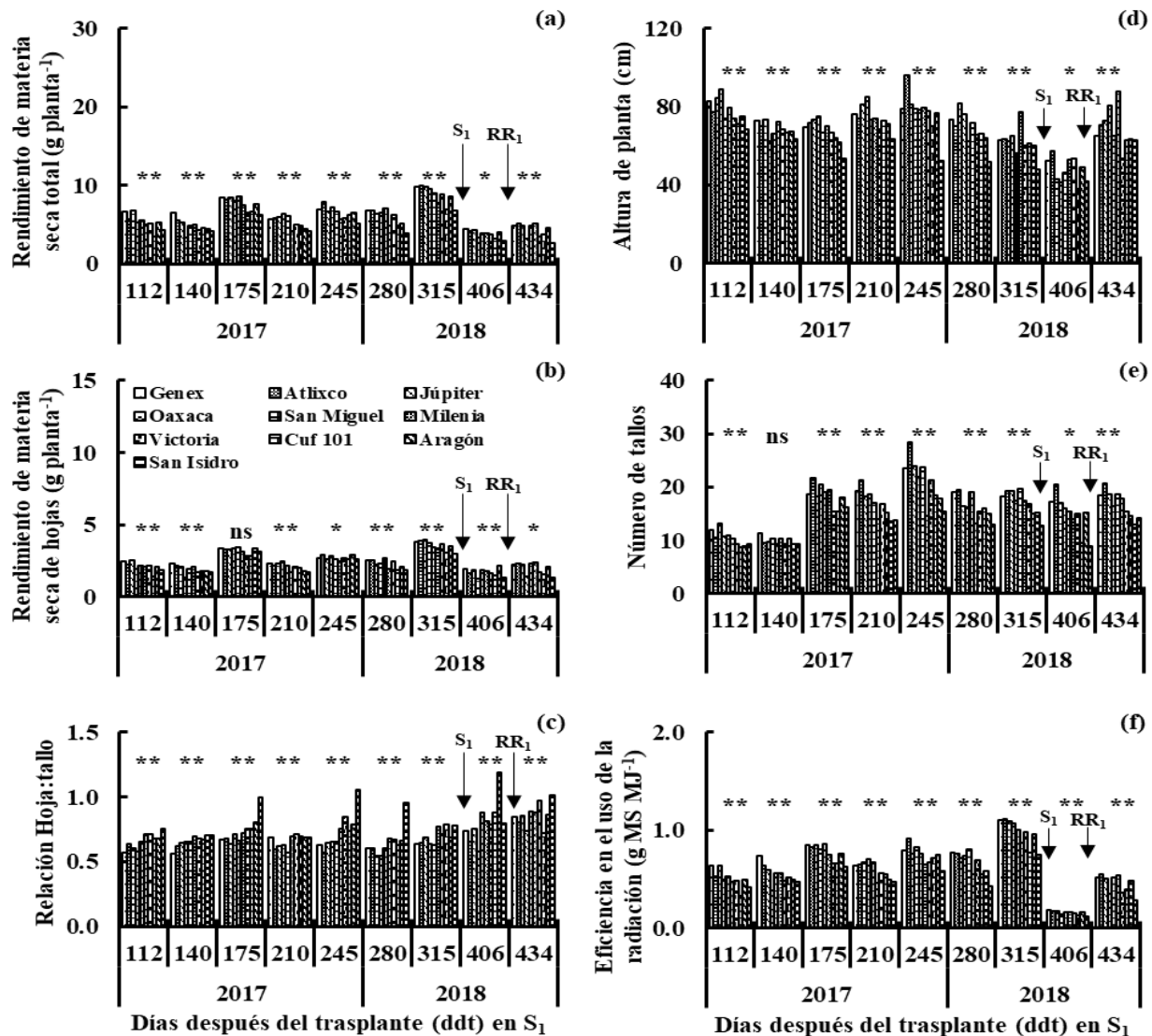


Figura 3.4. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en sequía (S_1), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

En S_2 las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia produjeron mayor RMST que las demás variedades a los 462, 490, 518, 553, 686 y 770 ddt; 490, 588 y 686 ddt; 553, 686 798 ddt; y 686 y 742 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Cuf 101 mostraron un RMST similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia a los 742 y 798 ddt; 518, 553 y 798 ddt; 462, 490, 518 y 588 ddt; 686 ddt; 518, 553 y 770 ddt; 518, 553, 588 y 686 ddt (Figura 3.5a; Cuadro

A2). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia y Cuf 101 produjeron mayor RMSH que las otras variedades a los 462, 518 y 770 ddt; 553 y 686 ddt; 553 y 798 ddt; 553, 686 y 742 ddt; y 553 ddt. Las variedades Genex, Júpiter, San Miguel, Milenia y Cuf 101 tuvieron un RMSH similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, San Miguel, Milenia y Cuf 101 a los 55 y 686 ddt; 462, 518 y 742 ddt; 770 ddt; 462 y 518 ddt; y 518 ddt (Figura 3.5b; Cuadro A4). Las variedades Victoria, Aragón y San Isidro mostraron mayor relación H:T que las demás variedades a los 553 ddt; 742 y 798 ddt; y 462, 490, 518, 588, 686, 770 y 798 ddt. Las variedades Júpiter, Milenia, Cuf 101, Aragón y San Isidro tuvieron una relación H:T similar a las variedades Victoria, Aragón y San Isidro a los 742 ddt; 742 ddt; 588, 742 y 798 ddt; 686 y 770 ddt; y 553 y 742 ddt (Figura 3.5c; Cuadro A6).

Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia tuvieron mayor AP que las demás variedades a los 553, 686 y 770 ddt; 490, 518 y 588 ddt; 742 y 798 ddt; 462 y 798 ddt; y 490 ddt. Las variedades Júpiter, Oaxaca Milenia y Victoria tuvieron una AP similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia a los 490, 553, 588, 686 y 770 ddt; 490 ddt; 462, 518, 588, 686 y 770 ddt; y 798 ddt (Figura 3.5d; Cuadro A8). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y San Miguel tuvieron mayor NT que las otras variedades a los 518 770 ddt; 462, 490, 553, 686, 742 y 798 ddt; 588 y 798 ddt; 742 y 770 ddt; y 798 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Victoria mostraron un NT similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y San Miguel a los 462 ddt; 588 ddt; 518 y 553 ddt; 462 ddt; 462 y 490 ddt; 462 ddt; y 462 ddt (Figura 3.5e; Cuadro A10). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia exhibieron mayor EUR que las otras variedades a los 462, 490, 518, 553, 686, 742 y 770 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Cuf 101 mostraron una EUR similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia a los 588 y 798 ddt; 490, 518, 553, 742 y

798 ddt; 462, 490, 518, 588 y 742 ddt; 742 ddt; 518, 553 y 588 ddt; 518, 553, 588, 686 y 742 ddt (Figura 3.5f; Cuadro A12).

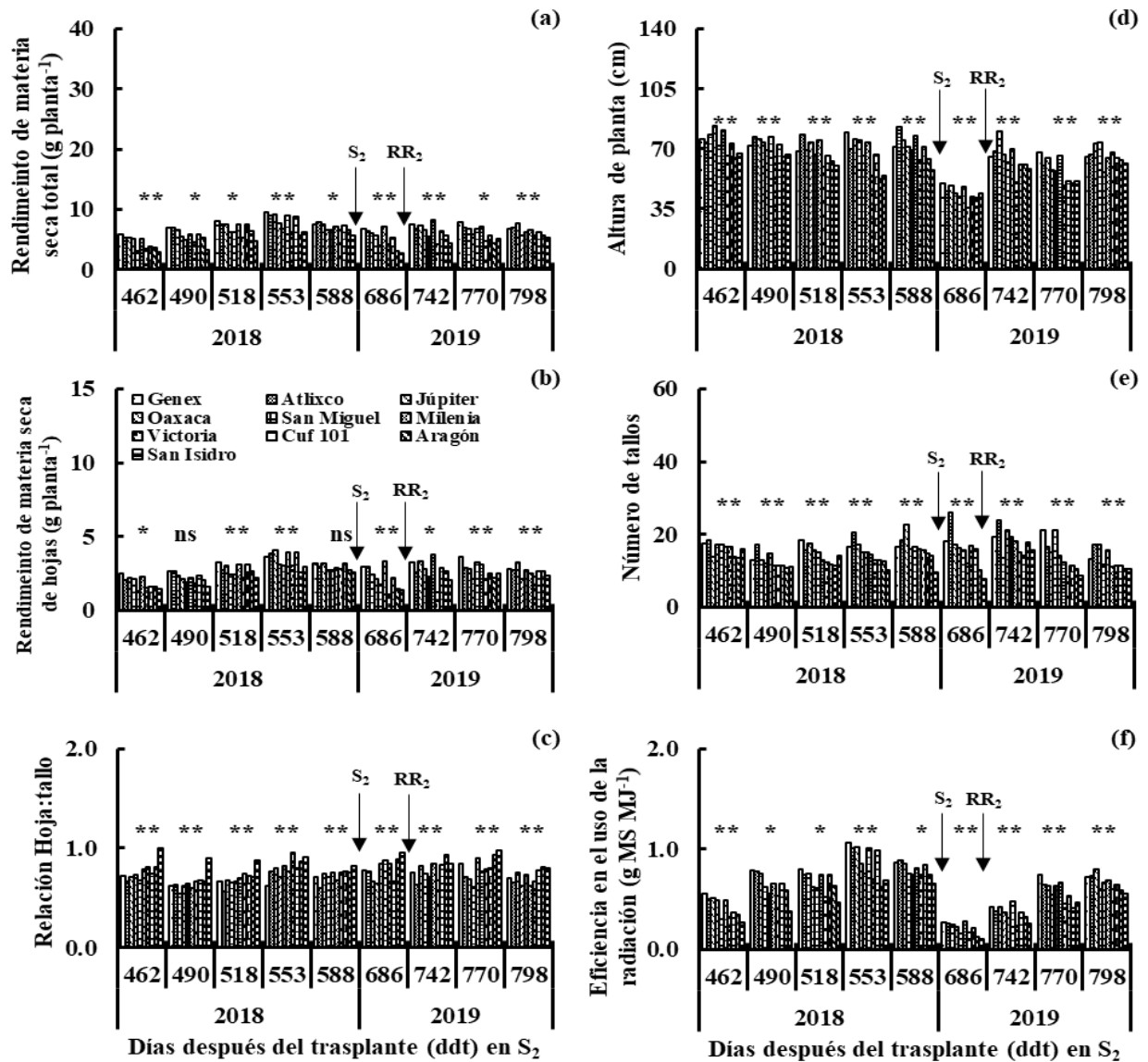


Figura 3.5. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de la parte aérea de la planta en sequía (S_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

En general en condiciones de sequía (S_1 y S_2), también el RMST y sus componentes RMSH, relación H:T, AP, NT y EUR variaron enormemente entre las diferentes variedades; Genex,

Atlixco, Júpiter y Milenia mostraron mayor RMST, RMSH, AP y EUR que las demás variedades, mientras Genex, Atlixco, Júpiter y San Miguel exhibieron mayor NT que las otras variedades; además, las variedades Aragón y San Isidro tuvieron mayor relación H.T que las otras variedades. El déficit hídrico del suelo disminuye el crecimiento y rendimiento de las plantas; en un estudio con 11 variedades diferentes de alfalfa en condiciones de invernadero con sequía, se determinó que la variedad RS fue la más sobresaliente al reducir en menor grado la elongación del tallo, la tasa relativa de crecimiento y la biomasa aérea con respecto al tratamiento de riego, además de mantener mayor capacidad del crecimiento de las raíces, contenido relativo de agua en las hojas, contenido de clorofila y mayor eficiencia en el uso del agua conforme el déficit hídrico se hizo más severo (Anower *et al.*, 2017). La variedad Gold Queen produjo mayor rendimiento de materia seca y carbohidratos hidrosolubles, y fue más resistente a sequía que la variedad Suntory en condiciones de campo; la sequía disminuyó el contenido de proteína cruda y aumentó la fracción de fibra en respuesta a la deficiencia hídrica en las dos variedades de alfalfa (Liu *et al.*, 2018). Otro estudio conducido durante 30 meses con 16 variedades de alfalfa en condiciones de campo con sequía, en el sur de Túnez, mostró que las variedades de alfalfa Amerist (EE. UU.), Sardi10 y Siriver (Australia), y Melissa (Francia) fueron las más tolerantes a sequía, debido a que produjeron hojas más delgadas, acumularon más prolina y potasio, y mantuvieron una mayor eficiencia en el uso del agua que las otras variedades (Benabderrahim *et al.*, 2015).

La relación H:T es un estimador de la calidad del forraje en alfalfa; fue interesante notar la consistencia mostrada por las variedades Aragón y San Isidro en sus altos valores promedio para la relación H:T, tanto en riego como en sequía. Al respecto de este importante carácter morfológico de la alfalfa, Anicchiario (2015), sugiere seleccionar fenotipos (líneas o familias de medios hermanos o clones) con alta relación H:T en poblaciones amplias de alfalfa, para mejorar la calidad

del forraje en esta especie, pues en un estudio que realizó en condiciones de campo con 125 materiales genéticos de alfalfa en Italia, observó que la relación H:T fue independiente del rendimiento de forraje debido a las bajas correlaciones genéticas negativas entre las progenies para estos caracteres de la planta y la falta de variabilidad en la relación H:T en el material seleccionado por alto rendimiento de forraje. No obstante, determinó valores altos de heredabilidad en sentido estrecho (0.75), lo cual puede ser útil en la selección de germoplasma de mejor calidad en campo.

1.3.4.3 Comparación riego (R_1 y R_2) vs. sequía (S_1 y S_2)

En riego en el periodo inicial del experimento (R_1) entre los 112 y los 345 ddt, el RMST, RMSH, NT y EUR fueron similares a los obtenidos en el tratamiento de sequía (S_1) en el mismo periodo de tiempo, sin embargo, después de la aplicación del primer periodo de déficit hídrico (S_1 , 345 a 406 ddt), estas características de la planta mostraron valores inferiores a los registrados en riego (R_1 y R_2) hasta la finalización del experimento (798 ddt), a pesar de que el contenido de humedad en el suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo (Figuras 3.6a, b, e y f; Cuadro A1, 2, 3, 4, 9, 10, 11 y 12). La relación H:T mostró un comportamiento diferente al observado para el RMST y sus componentes; la relación H:T en sequía fue mayor que en riego durante el primer periodo de sequía (S_1) y el periodo subsecuente (406 a 490 ddt), y durante el segundo periodo de sequía (S_2) y el segundo periodo subsecuente (688 a 742 ddt) (Figura 3.6c; Cuadro A5 y 6). Por el contrario, la altura de planta fue la única característica que mostró valores similares a los registrados en riego después de la aplicación del riego de recuperación (RR_1 , 406 ddt) y en el periodo subsecuente (490 a 588 ddt) (Figura 3.6d; Cuadro A7 y 8).

El déficit hídrico edáfico durante el primer periodo de sequía (S_1 , 345-406 ddt) disminuyó el RMST y sus componentes RMSH, NT y EUR con respecto al tratamiento de riego (R_1); esta diferencia en rendimiento y sus componentes, entre tratamientos de humedad edáfica se mantuvo a pesar de la

aplicación del riego de recuperación (RR_1 , 406 ddt) y riegos subsecuentes (406 a 620 ddt) en S_1 (Figuras 3.6a, b, e y f; Cuadro A2, 4, 10 y 12). En el segundo periodo de déficit hídrico (S_2 , 620-688 ddt), la deficiencia de humedad también redujo el RMST y sus componentes, y esta diferencia entre tratamientos de humedad edáfica se mantuvo aún después del riego de recuperación y riegos posteriores (RR_2 , 688 ddt) (Figuras 3.6a, b, e y f; Cuadro A2, 4, 10 y 12). La relación H:T fue mayor en sequía (S_1) que en riego (R_1) y esta diferencia se mantuvo después del riego de recuperación (RR_1) hasta los 498 ddt; posteriormente la relación H:T fue mayor en sequía (S_2) que en riego (R_2) durante el segundo periodo de déficit hídrico edáfico (Figura 3.6c y Cuadro A6). La AP fue menor en sequía (S_1) que en riego (R_1) entre los 406 y 462 ddt y en S_2 que en R_2 entre los 686 y 798 ddt (Figura 3.6d; Cuadro A8).

La alfalfa es un cultivo bien adaptado a condiciones de sequía y déficit de humedad del suelo en áreas de riego; la sobrevivencia de este cultivo a través de periodos de déficit hídrico, depende de la duración de la sequía, el genotipo, el suelo (capacidad hídrica del suelo y profundidad del sistema radical) y el ambiente (salinidad y temperatura), pero se ha observado que la alfalfa generalmente sobrevive a periodos cortos sin riego y puede recuperarse al recibir riego nuevamente, para producir rendimientos normales en los años subsecuentes (Orloff *et al.*, 2015). En el presente trabajo de investigación, se observó que después del primer periodo de sequía y hasta la finalización del estudio, las plantas de alfalfa sometidas a déficit hídrico, ya no recuperaron su productividad en términos de RMST, RMSH, NT y EUR en comparación con las plantas de riego; la diferencia entre los resultados que aquí se presentan y los obtenidos por Orloff *et al.* (2015), puede deberse a que las plantas crecidas en los tubos de PVC en condiciones de invernadero en el presente trabajo, tuvieron menos oportunidad de desarrollar su sistema radical y sus órganos aéreos que las plantas que crecieron en condiciones de campo, donde el desarrollo del déficit hídrico en la planta es más

lento y las raíces tienen mayor oportunidad de acceso a la humedad en el perfil del suelo.

La relación H:T aumentó en las plantas bajo sequía con respecto a las de riego después del primer periodo de déficit hídrico (S_1) y fue generalmente más alta en las plantas bajo estrés hídrico que en las de riego hasta el final del experimento. Los altos valores en la relación H:T pudieron deberse a una menor partición de asimilados al tallo con respecto a la hoja; las plantas muestran algunos cambios morfológicos en respuesta al estrés hídrico, al reducir la pérdida o aumentar la absorción de agua, para mantener el estatus hídrico del tejido (Anjum *et al.*, 2017). Otros estudios del efecto del estrés hídrico en diferentes variedades de alfalfa, mostraron que el déficit hídrico redujo la materia seca de hojas y tallos y los componentes de la tasa relativa de crecimiento como el cociente de área foliar (cm^2 de área foliar/mg de peso seco de la planta), área foliar específica (cm^2 de área foliar/mg de peso seco de las hojas) y el cociente del peso seco de hojas (mg de peso seco de las hojas/mg del peso seco de la planta) (Erice *et al.*, 2010).

La AP fue la única característica morfológica de la planta que mostró capacidad de recuperación después de la aplicación de agua (RR_1 y RR_2), al alcanzar valores similares a los observados en las plantas bajo riego; el déficit hídrico del suelo afecta diferentes características morfológicas de las plantas como la altura de la planta, diámetro del tallo, número, tamaño y área de las hojas, producción de materia seca, partición de asimilados, producción de flores y frutos, y madurez fisiológica (Anjum *et al.*, 2017). Sin embargo, la altura de planta junto con la fecha de floración y el rebrote fueron identificadas como características de la planta con alta precisión de predicción, para su utilización en programas de mejoramiento genético con la aplicación de selección genómica (Jia *et al.*, 2018).

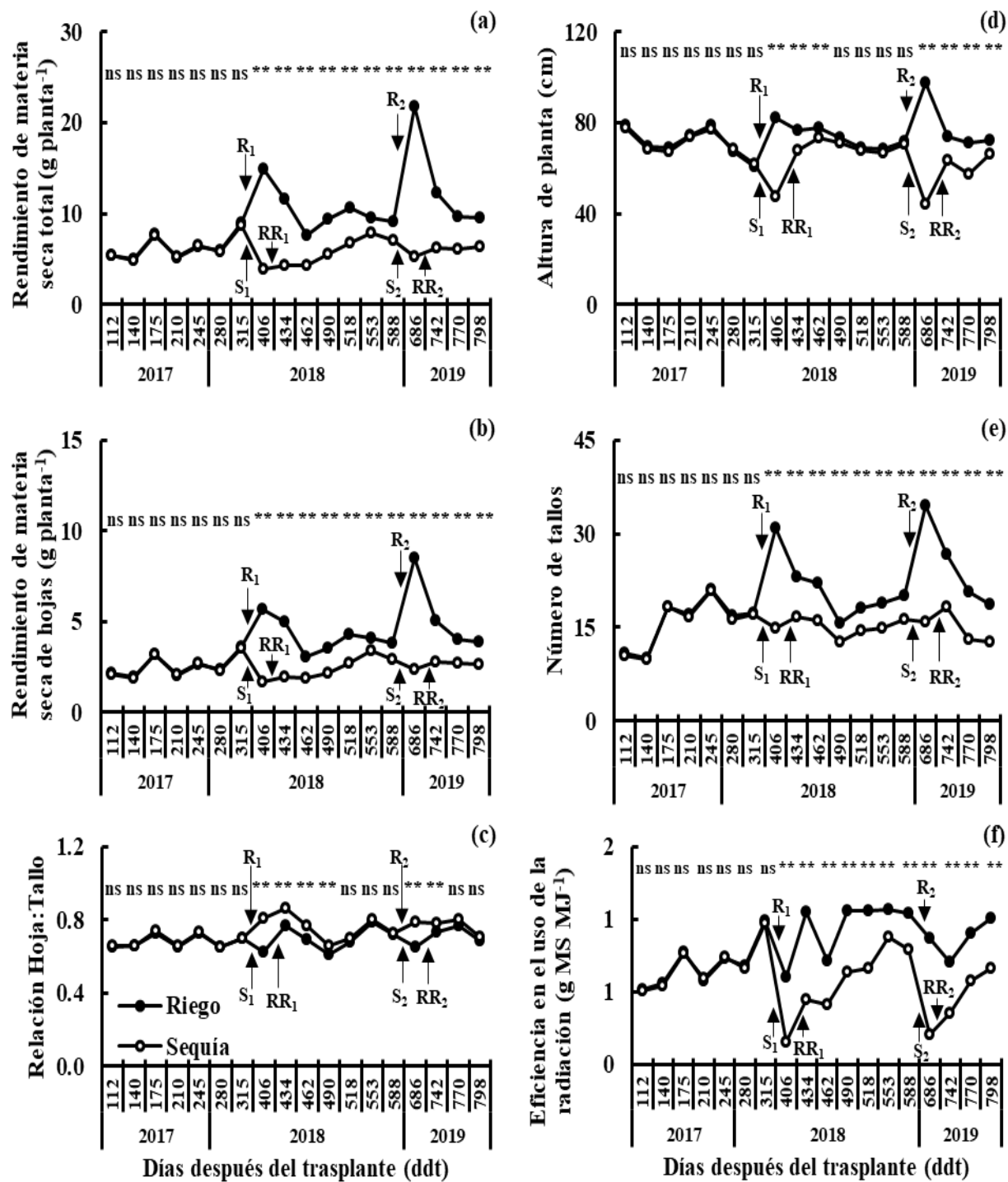


Figura 3. 6. Rendimiento de materia seca total (a), rendimiento de materia seca de hojas (b), relación hoja tallo (c), altura de planta (d), número de tallos (e) y eficiencia en el uso de la radiación (f), determinadas en nueve cortes de los órganos aéreos de la planta en riego (R₁ y R₂) y sequía (S₁ y S₂), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

1.3.5 Análisis de componentes principales

La variación entre ambientes y entre genotipos observada a través del análisis de componentes principales (CP), identificó a dos componentes que explican la mayor proporción de la variación total (75.8 %) mostrada en el experimento (Figura 3.7). El CP1 explicó el 56.2 % de la variación y tuvo correlación positiva con el rendimiento total de materia seca ($r=0.52$), rendimiento de materia seca de hojas (0.50), número de tallos ($r=0.42$), eficiencia en el uso de la radiación ($r=0.40$) y altura de planta ($r=0.34$), y correlación negativa con la relación H:T ($r=-0.19$). El CP2 explicó sólo el 19.6 % de la variabilidad observada y tuvo correlación positiva con la relación H:T ($r=0.78$) y rendimiento de materia seca de hojas ($r=0.31$), correlación negativa con altura de planta ($r=-0.49$). El rendimiento de materia seca total se relacionó positivamente con el número de tallos y el rendimiento de materia seca de hojas, y negativamente con altura de planta; la altura de planta se relacionó negativamente con la relación H:T (Figura 2.7). La variabilidad observada para el rendimiento de materia seca y sus componentes en el presente estudio fue similar a la observada en un grupo 27 poblaciones y cultivares de alfalfa en condiciones de campo, donde el CP1 contribuyó con el 58.2 % de la variabilidad total y mostró asociación positiva con el rendimiento de materia seca y verde, vigor, hábito de crecimiento, regeneración de la planta y ancho del foliolo central (Tucak *et al.*, 2009). Otros resultados en alfalfa con riego y secano en campo mostraron un CP1 con 54.3 % de la variabilidad total y asociación positiva con el diámetro de raíces laterales y número de raíces laterales o ramificadas (Odorizzi *et al.*, 2008). Es interesante señalar la similitud en los valores observados para el CP1 y la variabilidad entre genotipos en estos diferentes estudios y los caracteres de la planta que tuvieron mayor asociación positiva con dicho componente sobre todo el rendimiento de materia seca.

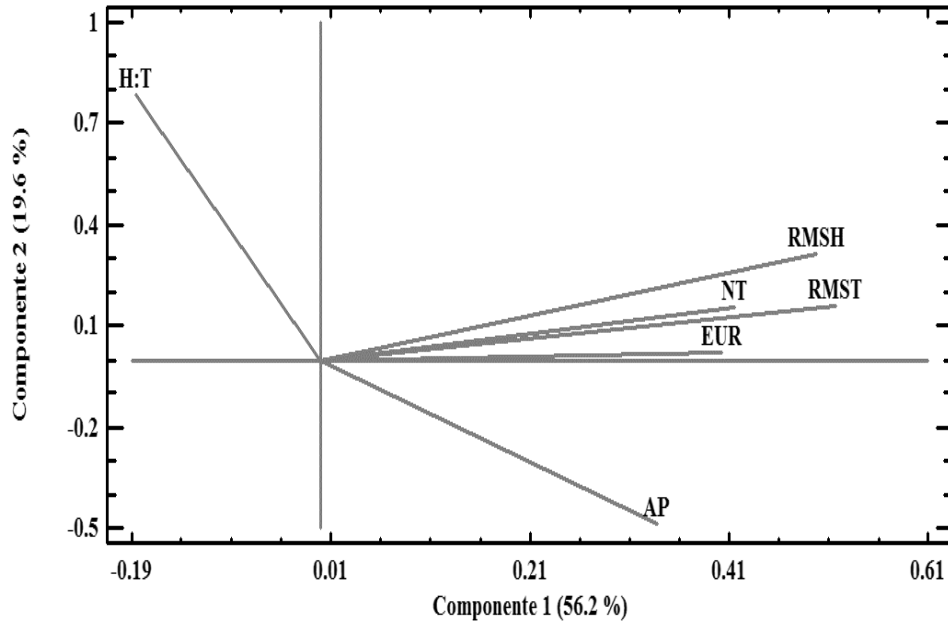


Figura 3.7. Plano biplot del rendimiento de materia seca versus rendimiento de materia seca total, rendimiento de materia seca de hojas, relación H:T, número de tallos, altura de planta y eficiencia en el uso de la radiación en riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2), en promedio de 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

1.4 CONCLUSIONES

El déficit hídrico del suelo o sequía disminuyó considerablemente el rendimiento de materia seca total y sus componentes, excepto, la relación hoja:tallo; la varianza fenotípica y sus componentes, la varianza genética aditiva y ambiental también fueron menores en sequía que en riego. La heredabilidad en sentido estricto fue baja para el rendimiento de materia seca de hojas a moderada para rendimiento total de materia seca, relación H:T, altura de planta, número de tallos y eficiencia en el uso de la radiación en riego y sequía. En sequía, la deficiencia de humedad redujo el rendimiento de materia seca total y sus componentes en comparación con riego, y esta diferencia en rendimiento se mantuvo aún después del riego de recuperación y riegos posteriores.

El rendimiento total de materia seca, rendimiento de materia seca de hojas, número de tallos, eficiencia en el uso de la radiación y altura de planta, se relacionaron positivamente con el

componente principal 1 (56.2 % de la variación total), y la relación H:T y el rendimiento de materia seca de hojas se asociaron positivamente con el componente principal 2 (19.6 % de la variación total).

Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia tuvieron mejor comportamiento productivo en condiciones de sequía que las demás líneas, y sería recomendable utilizarlas como variedades comerciales en áreas con limitaciones de humedad, y también como líneas parentales en los programas de mejoramiento genético de la resistencia a sequía en alfalfa.

1.5 LITERATURA CITADA

- Anjum, S. A., U. Ashraf, A. Zohaib, M. Tanveer, M. Naeem, I. Ali, T. Tabassum and U. Nazir. 2017. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. *Zemdirbyste-Agriculture* 104(3):267-276. Doi: 10.13080/z-a.2017.104.034.
- Annicchiarico, P. 2015. Alfalfa forage yield and leaf/stem ratio: narrow-sense heritability, genetic correlation, and parent selection procedures. *Euphytica* 205(2):409–420. Doi: 10.1007/s10681 015 1399 y.
- Anower, M. R., A. Boe, D. Auger, I. W. Mott, M. D. Peel, L. Xu, P. Kanchupati and Y. Wu. 2017. Comparative drought response in eleven diverse alfalfa accessions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203:1-13. Doi:10.1111/jac.12156.
- Bellague, D., M. M. Hammedi-Bouzina and A. Abdelguerfi. 2016. Measuring the performance of perennial alfalfa with drought tolerance indices. *Chilean Journal of Agricultural Research* 76(3): 273-284.
- Benabderrahim, M. A., H. Hamza, M. Haddad and A. Ferchichi. 2015. Assessing the drought tolerance variability in Mediterranean alfalfa (*Medicago sativa* L.) genotypes under arid conditions. *Plant Biosystems* 149 (2):395-403. doi.org/10.1080/11263504.2013.850121.
- 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.
- Bowley, S. R. and B. R. Christie. 1981. Inheritance of dry matter yield in a heterozygous population of alfalfa. *Canadian Journal of Plant Science* 61: 313-318.
- Erice, G., S. Louahlia, J. J. Irigoyen, M. Sánchez-Díaz, J. Ch. Avicé. 2010. Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Journal of Plant Physiology* 167:114-120.

- Falconer, D.S. 1984. *Introducción a la genética cuantitativa*. Cía. Editorial Continental, S. A. de C.V., México. 430 p.
- Galicia, M. 2012. *Varianza genética y mapeo molecular de rendimiento y calidad nutricional en familias de medios hermanos en Medicago sativa*. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 90 p.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Serie Libros Núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 90 p.
- Hill, J., H. C. Becker and P. M. A. Tigerstedt. 1998. *Quantitative and ecological aspects of plant breeding*. London: Chapman and Hall. 275 p.
- Hinkelmann, K. and Kempthorne, O. 2008. *Design and analysis of experiments. Volume 1: Introduction to experimental design*. A John Wiley and Sons, Inc., United States of America. 631 p.
- Huang, Z., Y. Liu, Z. Cui, Y. Fang, H. He, B.-R. Liu, G.-L. Wu. 2018. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China). *Field Crops Research* 221:1-6.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Jia, C., F. Zhao, X. Wang, J. Han, H. Zhao, G. Liu and Z. Wang. 2018. Genomic prediction for 25 agronomic and quality traits in alfalfa (*Medicago sativa*). *Frontiers in Plant Science* 9:1220. Doi: 10.3389/fpls.2018.01220.
- Lauriault, L., M. Marsalis, F. Contreras-Govea and S. Angadi. 2009. *Managing alfalfa during drought*. Circular 646, New Mexico State University, Cooperative Extension Service, College of Agricultural and Environmental Sciences. Las Cruces, New Mexico. 4 p.
- Liu, Y., Q. Wu, G. Ge, G. Han and Y. Jia. 2018. Influence of drought stress on alfalfa yields and nutritional composition. *BioMed Central Plant Biology* 18:13. Doi: 10.1186/s12870-017-1226-9
- Luna-Guerrero, M.J., C. López-Castañeda, A. Hernández-garay, P.A. Martínez-Hernández y M.E. Ortega-Cerrilla. 2018. Evaluación del rendimiento de materia seca y sus componentes en germoplasma de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 9(3):486-505.
- Márquez-Sánchez, F. and J. Sahagún-Castellanos. 1994. Estimation of genetic variances with maternal half-sib families. *Maydica* 39:197-201.
- Melendres-Martínez, J. I., R. Valdivia-Bernal, C. Lemus-Flores, R. Medina-Torres, M. García-López, M. Ortiz-Caton, A. Espinosa-Calderón y M. Tadeo-Robledo. 2018. Estimación de parámetros genéticos de maíz bajo mejoramiento por selección recíproca recurrente. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(7): 1327-1337.

- Molina, G. J. D. 1992. Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia). AGT editor, S. A. México, D. F. 349 p.
- Odorizzi, A., D. Basigalup, V. Arolfo y M. Balzarini. 2008. Análisis de la variabilidad de caracteres de raíz en poblaciones de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con alto número de raíces laterales. *AgriScientia* 25(2):65-73.
- Orloff, S., D. Putnam and K. Bali. 2015. Drought tip 92-33: Drought strategies for alfalfa. ANR Publication 8522, July 2015. <http://anrcatalog.ucanr.edu/> (Consultado en diciembre 9, 2019).
- Pembleton, K. G., R. P. Rawnsley, D. J. Donaghy and J. J. Volenec. 2009. Water deficit alters canopy structure but not photosynthesis during regrowth of alfalfa. *Crop Science* 49:722-731.
- Petcu, E., M. Schitea, L. Drăgan and N. Băbeanu. 2019. Physiological response of several alfalfa genotypes to drought stress. *Romanian Agricultural Research* 36:107-118.
- Riday, H. and E. Ch. Brummer. 2007. Narrow sense heritability and additive genetic correlations in alfalfa subsp. *falcata*. *The Journal of the Iowa Academy of Sciences* 114(1-4):28-34.
- SAS (Statistical Analysis System), Version 9.4 para Windows (2012). SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shao, H.-B., L.-Y. Chu, C. A. Jaleel, and C.-X. Zhao. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies* 331: 215–225.
- Sheaffer C. C., C. B. Tanner and M. B. Kirkham. 1988. Alfalfa water relations and irrigation. In: *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. A. A. Hanson, D. K. Barnes and R. R. Hill, Jr. (Eds.). Madison, WI, USA: ASA-CSSA-SSSA. Pp. 373–409.
- Tucak, M., S. Popović, T. Ćupić, G. Šimić, R. Gantner and V. Meglič. 2009. Evaluation of alfalfa germplasm collection by multivariate analysis based on phenotypic traits. *Romanian Agricultural Research* 26:47-52.

CAPÍTULO II. RELACIONES HÍDRICAS E INTERCAMBIO GASEOSO EN ALFALFA BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

La frecuente presencia de periodos de déficit hídrico en el suelo durante el ciclo biológico de la alfalfa y el incremento en la temperatura atmosférica global, debidos al cambio climático, pueden causar severas reducciones en la calidad y el rendimiento de materia seca. También, el alto costo y el aumento en la escasez del agua de calidad para el riego hacen cada vez más difícil, la producción de forraje en extensas áreas de México y el mundo. En años secos cuando la disponibilidad de riego es reducida, la alfalfa es el primer cultivo expuesto a las deficiencias hídricas, al considerar que es un cultivo de alta demanda de agua. No obstante, la alfalfa puede sobrevivir a periodos cortos de sequía, sin riego, y puede recuperarse, y producir rendimiento normalmente en años subsecuentes (Orloff, 2015). En estas condiciones el crecimiento de las plantas depende en gran medida del intercambio gaseoso, el cual involucra la pérdida de agua del tejido (transpiración) y la entrada de CO₂ al interior de la hoja (fotosíntesis). Dicho intercambio está regulado por la conductancia estomática, de tal forma que para lograr una mayor eficiencia en el uso del agua (W), cuando esta es escasa, la plantas deben reducir más su conductancia estomática a la pérdida de agua que a la asimilación de CO₂ (López-Castañeda, 1993).

El estatus hídrico de la planta guarda estrecha relación con la tasa de transpiración y los procesos de flujo de agua en el sistema vascular de la planta, de tal forma que un déficit hídrico del suelo puede causar una reducción en la conductancia estomática y la expansión del dosel vegetal, y un reacomodo de las hojas en una posición más vertical (Sim *et al.*, 2017). El déficit hídrico será más serio con el aumento de la temperatura en el futuro, poniendo al rendimiento de los cultivos bajo

una mayor amenaza (Harrison *et al.*, 2014). Por esta razón, el desarrollo de variedades con mayor resistencia a sequía y calor es una alternativa prometedora en la selección de genotipos mejor adaptados a condiciones de estrés. Así mismo, el descubrimiento de las bases genética, fisiológica y molecular de los mecanismos de resistencia al estrés será una herramienta indispensable para el diseño de nuevos cultivos y variedades tolerantes a sequía y calor (Zhao *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019).

La acumulación activa de solutos en la célula en respuesta al déficit hídrico se refleja en una disminución del potencial osmótico de la célula, debido al incremento en la concentración de solutos, tales como compuestos osmóticos protectivos, antioxidantes y reguladores del crecimiento (Fahad *et al.*, 2015). Estos solutos producidos en la célula contribuyen a la adaptación de las plantas al estrés ambiental al dominar la actividad de múltiples genes de respuesta al estrés que exhiben posibilidades atractivas para la aplicación del mejoramiento molecular (Morran *et al.*, 2011). En adición, la síntesis de acuaporinas y dehidrinas se han reportado como factores involucrados en la tolerancia a la sequía de numerosas especies (Perdiguero *et al.*, 2015). La respuesta de las plantas al déficit hídrico puede ayudar a exhibir los mecanismos genético-fisiológicos que determinan la resistencia a la sequía. Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la respuesta fenotípica de 10 variedades comerciales de alfalfa en sus relaciones hídricas y de intercambio gaseoso bajo riego y sequía en condiciones de invernadero.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Información del experimento

La información de localización del sitio experimental, germoplasma utilizado, diseño experimental y tratamientos de humedad edáfica, y contenido de humedad en el suelo, se presentan en detalle en Materiales y Métodos del Capítulo 3.

2.2.2 Variables medidas y calculadas

El potencial hídrico foliar (ψ), osmótico (π) y de turgencia (P), la tasa de fotosíntesis (A), tasa de transpiración (E), conductancia estomática (g) y temperatura (t) de la hoja, se midieron a los 345, 360, 377, 391 y 406 ddt en todas las plantas en riego (R_1) y sequía (S_1). Estos caracteres fisiológicos se midieron en un segundo periodo de sequía a los 620, 635, 658, 673 y 688 ddt en R_2 y S_2 . El ψ (MPa) se midió en un tallo completo con los folíolos superiores completamente expandidos y expuestos a la radiación solar, entre las 11:00 y 13:00 h, utilizando la bomba de presión o bomba de Scholander (Barrios-Gómez *et al.*, 2011). El π (MPa) se determinó en las muestras de los folíolos utilizados para medir el ψ ; los folíolos se colocaron en microtubos de plástico de 5 ml, mismos que se introdujeron en un termo con nitrógeno líquido a una temperatura de $-195\text{ }^\circ\text{C}$ durante 5 minutos, con el fin de matar el tejido, romper la pared celular y extraer la savia para la medición del π . El π se determinó en una alícuota de 100 μl de cada muestra, al utilizar un osmómetro modelo Typ 6M 10/25 μl , marca Löser (Germany) en el laboratorio. El P (MPa) se calculó como la diferencia entre los potenciales ψ y π ($P = \psi - \pi$), para cada muestra analizada (Begg and Turner, 1976). El ajuste osmótico (AO , MPa) de las plantas se calculó como la diferencia entre π determinado en riego (π_R) y el π medido en sequía (π_S), para cada variedad ($AO = \pi_R - \pi_S$) (Morgan, 1995).

La tasa de fotosíntesis neta (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la tasa de transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) se midieron al colocar una hoja completamente expandida dentro de la cámara de asimilación del analizador de gases infrarrojo (IRGA, modelo LI-6400, LI-COR Inc; Lincoln, Nebraska, EEUU), configurado para un sistema abierto, donde las mediciones se basan en las diferencias en la concentración de CO_2 y H_2O en la hoja y la concentración de CO_2 y H_2O en una corriente de aire que fluye a través de la hoja (LI-COR, 2008). La conductancia estomática (g_i , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la temperatura de la hoja (t , $^\circ\text{C}$) se midieron simultáneamente con la A y la E (LI-COR, 2008). La eficiencia transpiratoria o eficiencia en el uso del agua instantánea de la planta completa, medida por el intercambio gaseoso (W , $\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) se calculó al dividir A entre E ($W = A / E$) (Farquhar, 1991).

Los datos de temperatura y contenido de humedad edáfica registrado durante el experimento se consignan en Materiales y Métodos del Capítulo 3. También, el modelo estadístico utilizado para el cálculo del análisis de varianza, se indica en Materiales y Métodos del Capítulo 3.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Contenido hídrico del suelo

En riego (R_1 y R_2) el contenido hídrico del suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo durante el experimento, mientras en sequía (S_1 y S_2), la disponibilidad de humedad edáfica disminuyó por debajo del PMP entre los 361 a 407 ddt en S_1 y 634 a 687 ddt en S_2 , y se mantuvo en esa condición durante más tiempo en S_2 (53 d) que en S_1 (46 d) (Figura 1). Una disminución severa en el contenido de humedad en el suelo por debajo del límite de absorción de las raíces (PMP), puede afectar considerablemente la morfología, fisiología y rendimiento de la alfalfa (Pembleton *et al.*, 2009). Sin embargo, la deshidratación de la planta puede retardarse por medio de un periodo de

absorción más prolongado o una reducción de la transpiración; cuando el crecimiento de la raíz y la absorción se detienen en un suelo en secamiento, la alfalfa puede mantener el déficit hídrico al reducir (Erice *et al.*, 2010) y entonces detener (Sheaffer *et al.*, 1988) su crecimiento vegetativo.

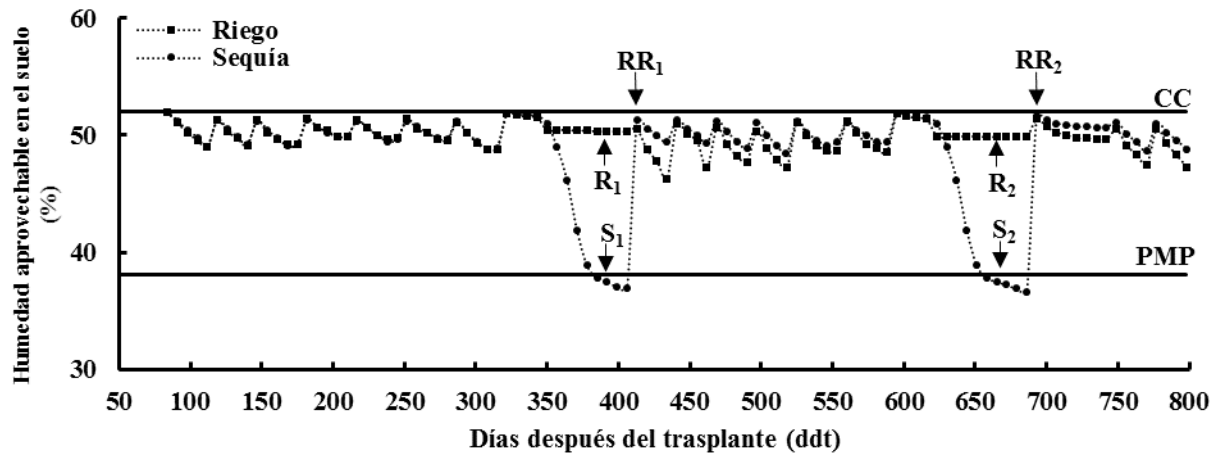


Figura 4.1. Contenido hídrico del suelo en los tratamientos de riego (R_1 y R_2) y sequía (S_1 y S_2) durante el experimento, en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC=Capacidad de campo y PMP=Porcentaje de marchitamiento permanente

2.3.2 Análisis de varianza

El análisis de varianza detectó diferencias ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad en el suelo para el potencial hídrico (ψ), potencial osmótico (π) y potencial de turgencia (P) en el periodo de 361 a 407 ddt en S_1 , y en el periodo de 635 a 688 ddt en S_2 . También, se detectaron diferencias ($p \leq 0.01$) entre genotipos para el ψ y π en los mismos periodos en S_1 y S_2 . El análisis estadístico detectó significancia ($p \leq 0.01$) en la interacción tratamientos de humedad del suelo*genotipos, para el ψ determinado a los 361, 378 y 407 ddt en S_1 y 635, 658 y 688 ddt en S_2 , y diferencias ($p \leq 0.05$), para el P determinado a los 635 y 688 ddt en S_2 (Cuadro 4.1).

Por otro lado, se detectó significancia ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad edáfica para la tasa de asimilación neta (A), tasa de transpiración (E), conductancia estomática (g), eficiencia en el uso del agua (W) y temperatura de la hoja (T) en el periodo de 361 a 407 ddt en S_1 , y diferencias

($p \leq 0.01$) para *A*, *E* y *g* en el periodo de 635 a 688 ddt, y *W* en el periodo de 658 a 688 ddt y *T* en el periodo de 635 a 673 ddt en S_2 . La variación entre genotipos fue significativa ($p \leq 0.01$) para *A* y *g* a los 361 ddt, y *W* a los 407 ddt, y mostró diferencias ($p \leq 0.05$) entre genotipos para *A* los 378, 392 y 407 ddt; *E* a 361 y 407 ddt; *g* a los 378 y 407 ddt; y *T* a los 361 ddt en S_1 ; *A* los 658 ddt, *E* a los 634 y 688 ddt, *g* a los 658 y 688 ddt en S_2 . La interacción tratamientos de humedad edáfica*genotipos mostró significancia ($p \leq 0.05$) para *A* los 378 ddt, *g* a los 407 ddt, y *W* a los 407 ddt en S_1 , y diferencias ($p \leq 0.01$) para *W* a los 688 ddt en S_2 (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de la suma de cuadrados para el potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P); tasa de asimilación neta (A), tasa de transpiración (E) y conductancia estomática (g), y eficiencia en el uso del agua (W), temperatura de la hoja (T) y (contenido relativo de agua (%), determinados riego y sequía en 10 variedades de alfalfa. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

FV	GL	Ψ (MPa)					π (MPa)					P (MPa)				
		346	361	378	392	407	346	361	378	392	407	346	361	378	392	407
R₁ y S₁																
A	1	0.004ns	3.08**	17.96**	36.65**	66.64**	0.0005ns	0.98**	7.27**	17.51**	32.33**	0.007ns	0.578**	2.381**	3.457**	6.123**
B	9	0.002ns	0.029**	0.035**	0.023**	0.036**	0.0015ns	0.04**	0.05**	0.058**	0.078**	0.002ns	0.005ns	0.004ns	0.009ns	0.012ns
A*B	9	0.001ns	0.008*	0.015**	0.008ns	0.020**	0.0022ns	0.001ns	0.001ns	0.001ns	0.001ns	0.003ns	0.014ns	0.022ns	0.014ns	0.030ns
Error	20	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.0020	0.010	0.012	0.013	0.015	0.003	0.013	0.013	0.012	0.014
R₂ y S₂																
		620	635	658	673	688	620	635	658	673	688	620	635	658	673	688
A	1	0.0004ns	4.24**	27.71**	56.17**	84.22**	0.003ns	1.388**	12.837**	27.79**	43.89**	0.002ns	0.778**	2.852**	4.88**	6.49**
B	9	0.003ns	0.05**	0.035**	0.02*	0.038**	0.001ns	0.040**	0.048**	0.057**	0.076**	0.004ns	0.004ns	0.004ns	0.01ns	0.01ns
A*B	9	0.004ns	0.02**	0.015**	0.01ns	0.018**	0.004ns	0.001ns	0.001ns	0.001ns	0.001ns	0.011ns	0.032*	0.022ns	0.014ns	0.03*
Error	20	0.004	0.003	0.003	0.005	0.005	0.003	0.011	0.013	0.013	0.013	0.005	0.013	0.01	0.014	0.01
R₁ y S₁																
		A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					g ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
		346	361	378	392	407	346	361	378	392	407	346	361	378	392	407
A	1	0.15ns	479.0**	1443.2**	1922**	2520.9**	0.039ns	35.6**	102.7**	143.9**	182.2**	0.0002ns	0.063**	0.17**	0.24**	0.29**
B	9	3.11ns	4.8**	1.3*	2.4*	2.3*	0.341ns	0.36*	0.13ns	0.25ns	0.25*	0.0007ns	0.0005**	0.0003*	0.0005ns	0.0006*
A*B	9	2.95ns	0.9ns	1.2*	2.2ns	1.4ns	0.316ns	0.08ns	0.11ns	0.22ns	0.18ns	0.0006ns	0.0002ns	0.0002ns	0.0004ns	0.0005*
Error	20	2.61	1.0	0.6	1.1	0.9	0.22	0.12	0.08	0.13	0.11	0.0004	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002
R₂ y S₂																
		620	635	658	673	688	620	635	658	673	688	620	635	658	673	688
A	1	1.3ns	511.1**	1567.2**	1696.6**	2477.3**	0.06ns	28.6**	98.1**	110.1**	174.6**	0.0001ns	0.05**	0.17**	0.18**	0.3**
B	9	2.4ns	2.9**	2.2*	1.4ns	2.8**	0.16ns	0.22*	0.23ns	0.2ns	0.3*	0.0003ns	0.0005**	0.001*	0.0005ns	0.0008*
A*B	9	3.7ns	1.8ns	0.7ns	1.9ns	1.7n	0.23ns	0.16ns	0.10ns	0.2ns	0.2ns	0.0005ns	0.0004ns	0.0002ns	0.0005ns	0.0004ns
Error	20	1.8	0.9	0.9	1.3	0.9	0.16	0.10	0.11	0.2	0.1	0.0003	0.0002	0.0002	0.0004	0.0003
R₁ y S₁																
		W ($\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) ^a					T (°C)									
		346	361	378	392	407	346	361	378	392	407					
A	1	0.09ns	0.04**	26.4**	44.0**	255.9**	0.2ns	338.4**	236.8**	117.6**	459.3**					
B	9	0.07ns	0.06ns	0.09ns	0.20ns	5.1**	3.2ns	0.5*	4.3ns	0.5ns	1.5ns					
A*B	9	0.04ns	0.02ns	0.06ns	0.10ns	4.9*	2.6ns	4.0ns	3.6ns	2.2ns	1.4ns					
Error	20	0.33ns	0.20	1.9	0.16	1.7	3.5	4.0	4.1	2.9	2.7					
R₂ y S₂																
		620	635	658	673	688	620	635	658	673	688					
A	1	0.002ns	0.261ns	16.64**	41.0**	313.3**	0.9ns	363.6**	161.7**	370.5**	271.8					
B	9	0.011ns	0.015ns	0.29ns	0.71ns	4.3**	0.7ns	1.3ns	0.5ns	0.8ns	1.1ns					
A*B	9	0.025ns	0.020ns	0.22ns	0.60ns	3.5**	1.1ns	1.0ns	0.7ns	0.7ns	0.7ns4					
Error	20	0.52	0.240	0.26	0.44	0.3	2.7	2.3	2.5	1.6	2.0					

2.3.3 Relaciones hídricas

El déficit hídrico del suelo es el factor abiótico adverso que mayor impacto tiene en la sobrevivencia, crecimiento y productividad de los cultivos. La sequía fue más severa y tuvo mayor duración en S₂ que en S₁; el ψ , π y P en riego (R₁ y R₂) fueron consistentemente más altos que en sequía (S₁ y S₂) en promedio de todos los genotipos; en S₁ el ψ , π y P disminuyeron de -0.6, -1.6 y 1 MPa, al inicio del periodo de déficit hídrico (345 ddt) a -3.1, -3.5 y 0.4 MPa al finalizar el periodo de sequía (406 ddt); en R₁ el ψ , π y P se mantuvieron en un promedio de -0.6, -1.6 y 1 MPa durante el periodo de déficit hídrico (Figuras 4.2a, b y c; Cuadro B1). En S₂ el ψ , π y P disminuyeron de -0.6, -1.6 y 1 MPa, al inicio de la sequía (620 ddt) a -3.5, -3.7 y 0.2 MPa al término del periodo de déficit hídrico (688 ddt); en R₂ el ψ , π y P fueron -0.6, -1.6 y 1 MPa en promedio durante el periodo de deficiencias hídricas del suelo (Figuras 4.2d, e y f; Cuadro B2). El potencial hídrico de la alfalfa en tres tratamientos de déficit hídrico del suelo disminuyó a -0.5, -0.5 y -0.35 MPa con respecto al testigo bien irrigado, y esta reducción en el potencial hídrico se reflejó en una disminución de 29, 23 y 20 % en la producción de materia seca, respectivamente (Godoy-Avila *et al.*, 2003). La expansión foliar y la senescencia de las hojas son características relacionadas con el crecimiento y rendimiento de materia seca de la planta y son muy sensitivas al déficit hídrico; en alfalfa se ha determinado que el germoplasma tolerante a sequía tiene características de bajo marchitamiento en condiciones de estrés hídrico, más plantas con tus tejidos verdes bajo condiciones de estrés severo y más tallos por planta en condiciones de estrés y condiciones favorables, además de una amplia variabilidad genética de en caracteres fisiológicos y morfológicos de la planta (Anicchiarico *et al.*, 2012).

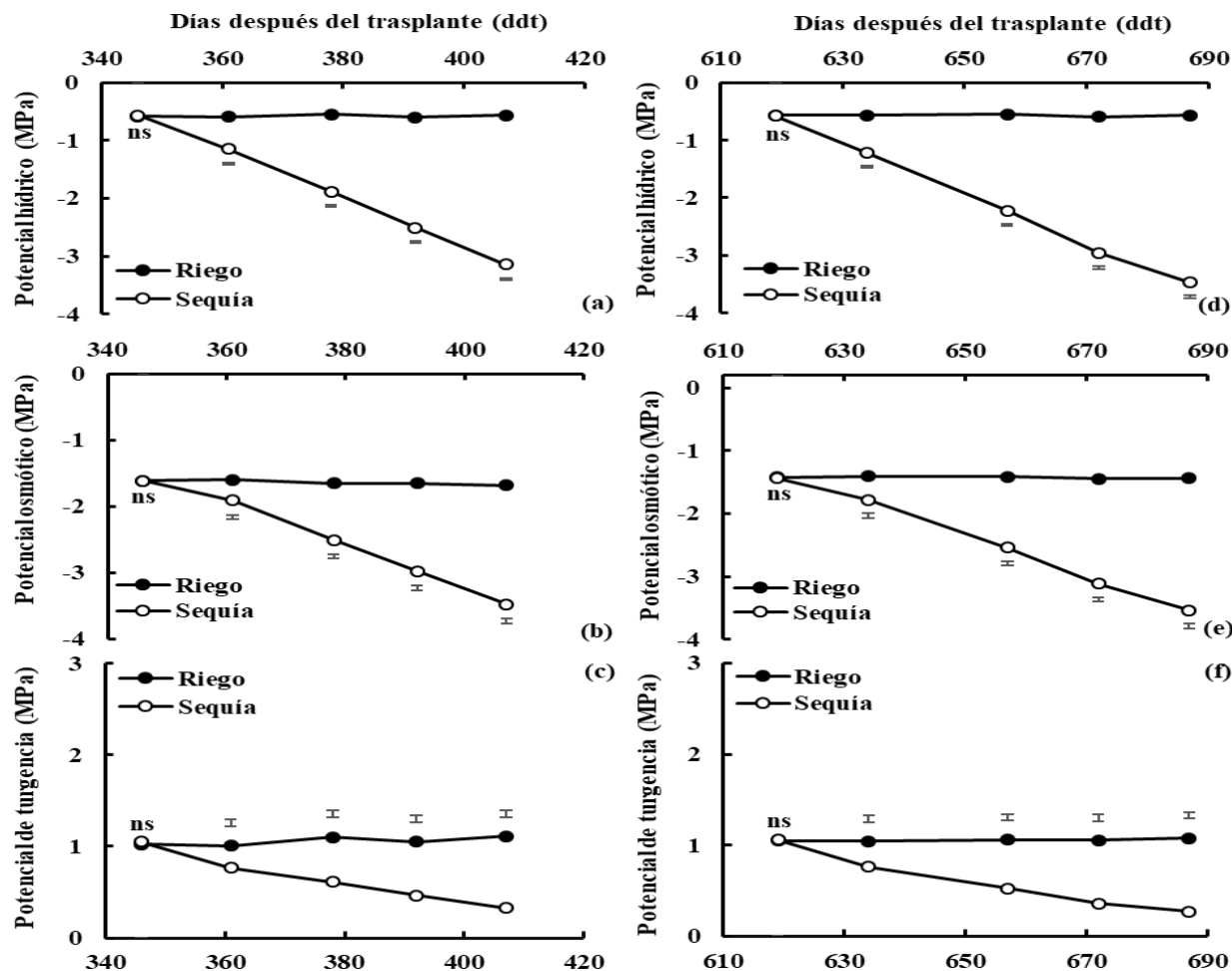


Figura 4. 2. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R_1) y sequía (S_1) (a, b y c), y riego (R_2) y sequía (S_2) (d, e y f) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

La respuesta de la planta en el ψ , π y P entre genotipos fue similar en riego (R_1) en todas las fechas de medición (Figuras 4.3a, b y c; Cuadro B1), mientras en sequía (S_1), el déficit hídrico del suelo disminuyó significativamente el ψ , π y P desde los 361 ddt, alcanzando sus valores más bajos o negativos, al finalizar el tratamiento de sequía (407 ddt). La variedad Genex mostró alto ψ a los 361 y 378 ddt (Figura 4.3d; Cuadro B1); π a los 392 y 407 ddt (Figura 4.3e; Cuadro B1), y P a los 378 ddt (Figura 4.3f; Cuadro B1). La variedad Júpiter tuvo alto ψ a los 392 y 407 ddt (Figura 4.3d; Cuadro B1), y π a los 361, 378 y 407 ddt (Figura 4.3e; Cuadro B1). La variedad Atlixco tuvo alto π a los 361 y 407 ddt (Figura 4.3e; Cuadro B1). La variedad Victoria mostró alto π a los 361 ddt

(Figura 4.3e; Cuadro B1). Las variedades Júpiter, Atlixco y Milenia mostraron ψ similar a Genex a los 361 ddt; Júpiter mostró ψ similar a los 361 ddt; Genex mostró ψ similar a Júpiter a los 392 y 407 ddt (Figura 4.3d; Cuadro B1). Las variedades Genex, Milenia y Aragón tuvieron π similar a Júpiter, Atlixco y Victoria a los 361 ddt; las variedades Atlixco y Victoria tuvieron π similar a Júpiter a los 378 ddt; las variedades Júpiter, Atlixco y Milenia mostraron π similar a Genex a los 392 ddt; y las variedades Milenia, Victoria y Aragón fueron similares en π a Genex, Júpiter y Atlixco (Figura 4.3e; Cuadro B1). La variedad Milenia mostró P similar a Genex a los 378 ddt (Figura 4.3f; Cuadro B1).

En S_2 la variedad Genex mostró alto ψ a los 634, 672 y 687 ddt (Figura 3.4d; Cuadro B2) y π a los 657, 672 y 687 ddt (Figura 4.4e; Cuadro B2). La variedad Atlixco tuvo alto ψ a los 634 ddt (Figura 4.4d; Cuadro B2), π a los 634 ddt (Figura 4.4e; Cuadro B2) y P a los 634 ddt (Figura 4.4f; Cuadro B2). La variedad Milenia presentó alto ψ a los 634, 657 y 687 ddt (Figura 4.4d; Cuadro B2), π a los 672 ddt (Figura 4.4e; Cuadro B2) y P a los 657 ddt (Figura 4.4f; Cuadro B2). La variedad Genex mostró ψ similar a Milenia a los 657 ddt; las variedades Atlixco y Milenia tuvieron ψ similar a Genex a los 672 ddt; y Atlixco mostró ψ similar a Genex y Milenia a los 687 ddt (Figura 4.4d; Cuadro B2). La variedad Milenia tuvo π similar a Atlixco a los 634 ddt; las variedades Atlixco y Milenia tuvieron π similar a Genex a los 657 ddt; la variedad Atlixco tuvo π similar a Genex y Milenia a los 672 ddt; y las variedades Atlixco y Milenia fueron similares en π a Genex a los 687 ddt (Figura 4.4e; Cuadro B2). Las variedades Genex y San Isidro mostraron P similar a Atlixco a los 634 ddt (Figura 4.4f; Cuadro B2).

Grimes *et al.* (1992) sometieron plantas adultas de las variedades de alfalfa Cuf 101, Moapa 69 y WL 318 a diferentes niveles de humedad en el suelo y observaron que el ψ determinado a medio día permaneció esencialmente constante para todos los cultivares a pesar de que el contenido de humedad en el perfil del suelo a 2.4 m de profundidad ($\approx 60\%$ de la humedad extraíble por la

planta) disminuyó a $\approx 0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; la reducción progresiva del contenido de humedad en el suelo disminuyó linealmente el ψ de todos los genotipos hasta que la disponibilidad de agua en el suelo fue muy baja; la tasa de disminución del ψ varió entre genotipos con la disminución en el contenido de humedad en el suelo, mostrando una respuesta similar entre las variedades Moapa 69 y WL 318 (-2 MPa), y diferente a la de Cuf 101 (-3 MPa). En otra leguminosa como el frijol común, se observó que las variedades que mantuvieron potenciales hídricos y de turgencia más altos, también registraron menor temperatura del dosel y presumiblemente mayor apertura de los estomas y transpiración a pesar del déficit hídrico del suelo (Barrios-Gómez *et al.*, 2011).

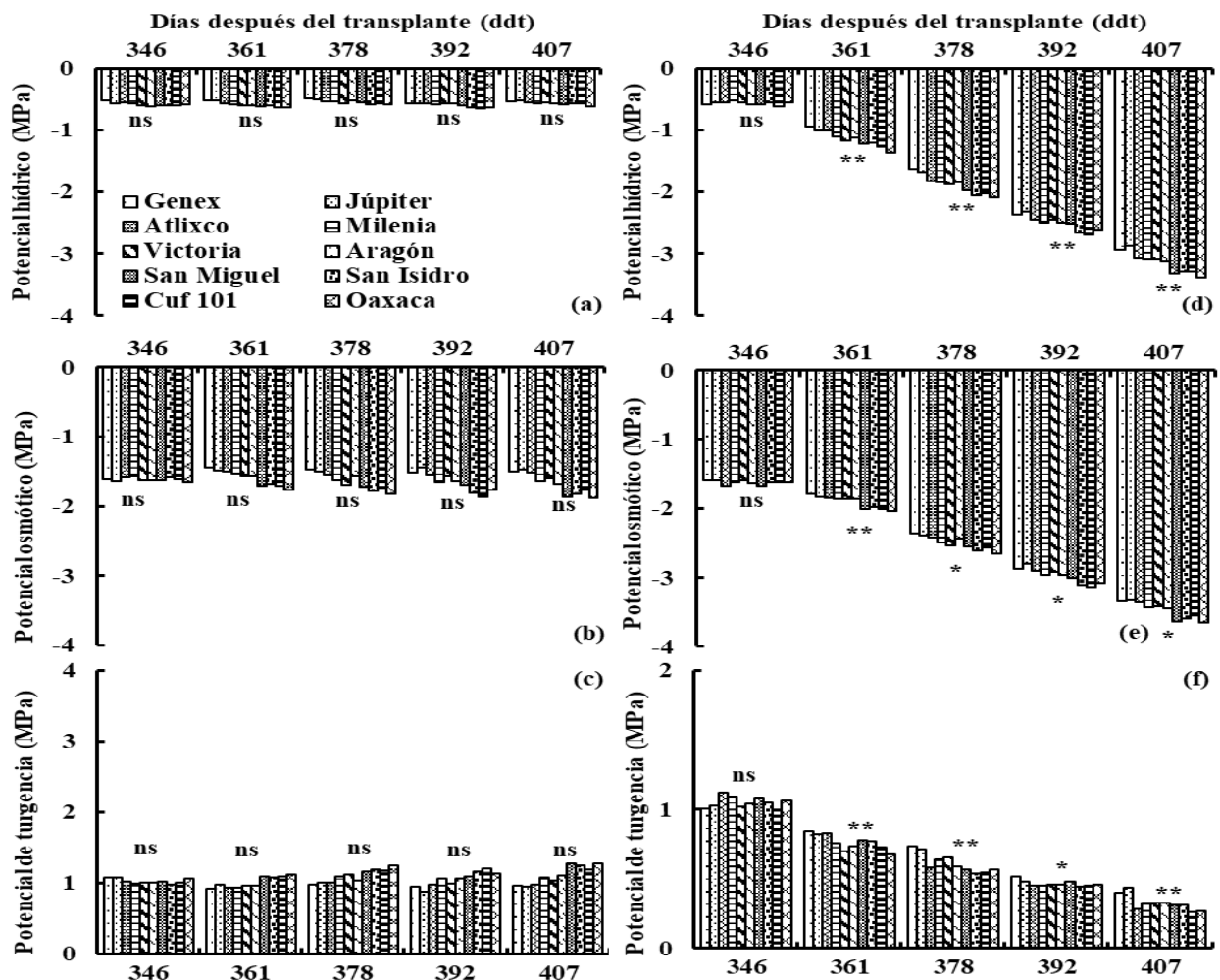


Figura 4. 3. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R_1) (a, b y c), y sequía (S_1) (d, e y f) para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

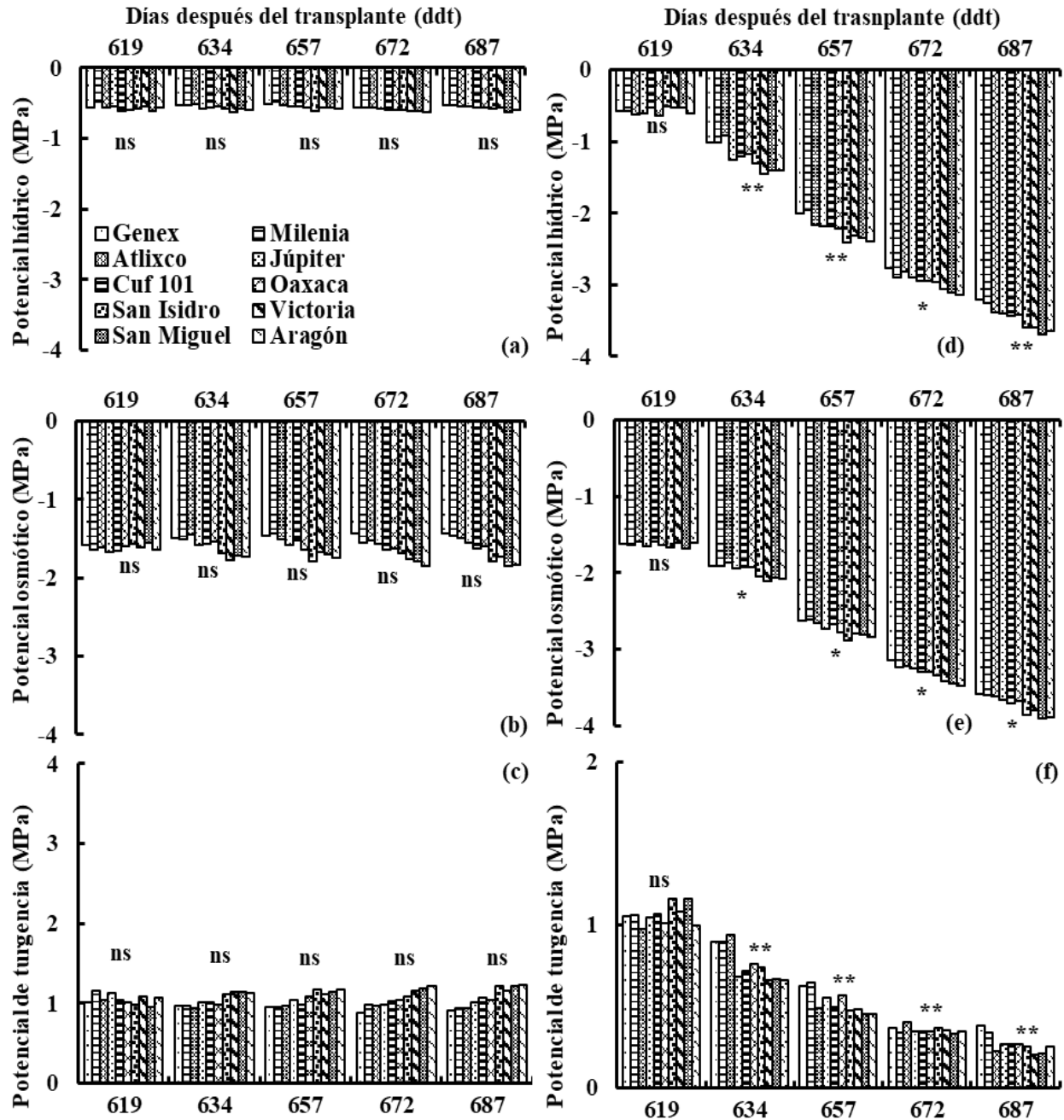


Figura 4.4. Potencial hídrico, osmótico y de turgencia en riego (R_2) (a, b y c), y sequía (S_2) (d, e y f) para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

2.3.4 Ajuste osmótico

El ajuste osmótico ($AO = R_{\pi} - S_{\pi}$) calculado como la diferencia entre el potencial osmótico de la planta en condiciones favorables de humedad o riego (π_R) y el potencial osmótico determinado en las plantas bajo sequía (π_S), aumentó significativamente al acentuarse la sequía con valores de 0.39 a 1.70 MPa en S_1 (361 a 407 ddt) y de 0.46 a 1.96 MPa en S_2 (634 a 687 ddt), en promedio de todos los genotipos (Figura 4.5). El mayor periodo de sequía en S_2 se reflejó en una mayor capacidad de ajuste osmótico que en S_1 (Figura 4.5; Cuadro B3).

El ajuste osmótico es uno de los mecanismos celulares adaptativos a sequía, salinidad y congelamiento; la deshidratación de la célula entra a un estado de tensión osmótica debido al aumento en la concentración celular de solutos (Blum, 2015). La acumulación activa de solutos orgánicos sintetizados por la planta en respuesta al estrés hídrico, sin duda juega un papel muy importante para la sobrevivencia en condiciones de estrés. Zhang *et al.* (2019) también observaron que el estrés hídrico inducido con la utilización de polietileno glicol (PEG-6000) a una tensión hídrica de -1.2 MPa, redujo el crecimiento y la capacidad fotosintética con un aumento en la concentración de malondialdehído (MDA), especies reactivas al oxígeno (ROS), osmolitos y antioxidantes, incluyendo ascorbato reducido y glutatión, actividad del ascorbato peroxidasa (APX) y la expresión de genes de enzimas antioxidativas (*MsCu/Zn-SOD*, *MsFeSOD*, *MtPOD*, *MsGPX*, *MsAPX*, *MsMDAR*, *MtDHAR* y *MsGR*). El mantenimiento de los procesos fisiológicos y el *status* hídrico de la hoja sugiere que la alfalfa tiene algunos mecanismos importantes para mantener el funcionamiento celular cuando la planta está sujeta a déficit hídrico. El aumento en la concentración de malondialdehído bajo condiciones de sequía indica que algún grado de daño a las membranas celulares es inevitable, mientras otros resultados muestran que aumentos en el contenido de la prolina y azúcares solubles, y actividades del superóxido dismutasa, peróxido

dismutasa y catalasa son indicadores de que la función celular puede seguirse manteniendo a algún grado para resultar en una mayor eficiencia en el uso del agua. El mantenimiento de la función celular bajo déficit hídrico puede estar relacionada con los procesos de anti-oxidación y ajuste osmótico (He *et al.*, 2012).

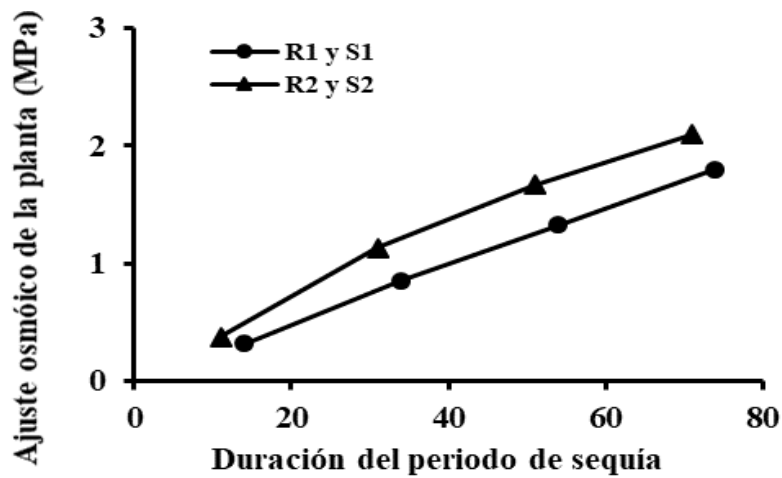


Figura 4. 5. Capacidad de ajuste osmótico de las plantas sometidas a dos periodos de sequía (S₁ y S₂) y sus respectivos periodos de riego (R₁ y R₂) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

La capacidad de ajuste osmótico de la planta observada entre genotipos fue substancial; en S₁ las variedades Genex, Júpiter y Atlixco tuvieron altos valores de AO a los 361, 378, 392 y 407 ddt; la variedad Victoria mostró mayor AO a los 361 y 378 ddt, y la variedad Aragón tuvo mayor AO a los 407 ddt (Figura 4.6a; Cuadro B3). En S₂ las variedades Genex, Milenia y Atlixco mostraron alto AO a los 634, 657 y 672 ddt; la variedad Oaxaca mostró alto AO a los 672 y 687 ddt, la variedad Cuf 101 mostró alto AO a los 634 ddt, y la variedad Júpiter tuvo alto AO a los 657 ddt. Las variedades Genex, Milenia y Atlixco mostraron un AO similar a Oaxaca a los 687 ddt (Figura 4.6b; Cuadro B3). La alta capacidad de ajuste osmótico observada en los dos periodos de sequía (S₁ y S₂) contribuyó a mantener la sobrevivencia de la planta, la turgencia de los órganos y tejidos de las

planta, y en consecuencia, el crecimiento y acumulación de materia seca. Abid *et al.* (2016) observaron que el déficit hídrico causó una reducción significativa especialmente en el peso seco de hojas de tres poblaciones de alfalfa (Chemini, Ganouch y Tebelbou) con un incremento significativo en el contenido de prolina, azúcares totales solubles, aminoácidos y potasio en hojas y raíces; la población Chemini mostró el mayor contenido de solutos y por el contrario Tebelbou, pareció ser la variedad más afectada por la sequía al mostrar los valores más bajos de solutos; la estrecha relación entre el contenido de prolina y algunos osmolitos, indicó que este es un importante indicador de tolerancia a la sequía en plantas de alfalfa.

El examen del comportamiento individual de los genotipos de alfalfa utilizados en el presente estudio bajo condiciones de déficit hídrico indicó que las variedades Genex, Atlixco y Milenia en S_1 y las variedades Genex, Júpiter, Atlixco y Milenia en S_2 mantuvieron valores más altos para el potencial ψ , π y P . Esta capacidad genético-fisiológica que desarrollaron los genotipos sobresalientes, para mantener la hidratación de sus tejidos a pesar del severo estrés hídrico que sufrieron bajo sequía, se reflejó también en una alta capacidad de ajuste osmótico de la planta. Slama *et al.* (2011) observaron que el cultivar Tamantit, entre un grupo de variedades de alfalfa procedentes de la cuenca del mediterráneo, evaluadas bajo condiciones de sequía en Túnez, mostró mejor tolerancia al déficit hídrico al producir mayor biomasa, tener mayor desarrollo del sistema radical, mayor capacidad de acumulación de prolina y azúcares solubles, y mayor capacidad de protección del aparato fotosintético contra el estrés oxidativo generado por el déficit hídrico. Además, observaron un incremento significativo en la concentración de prolina y azúcares solubles bajo condiciones de estrés hídrico, particularmente en el cultivar más tolerante, puede considerarse como el principal factor involucrado en el proceso de ajuste osmótico.

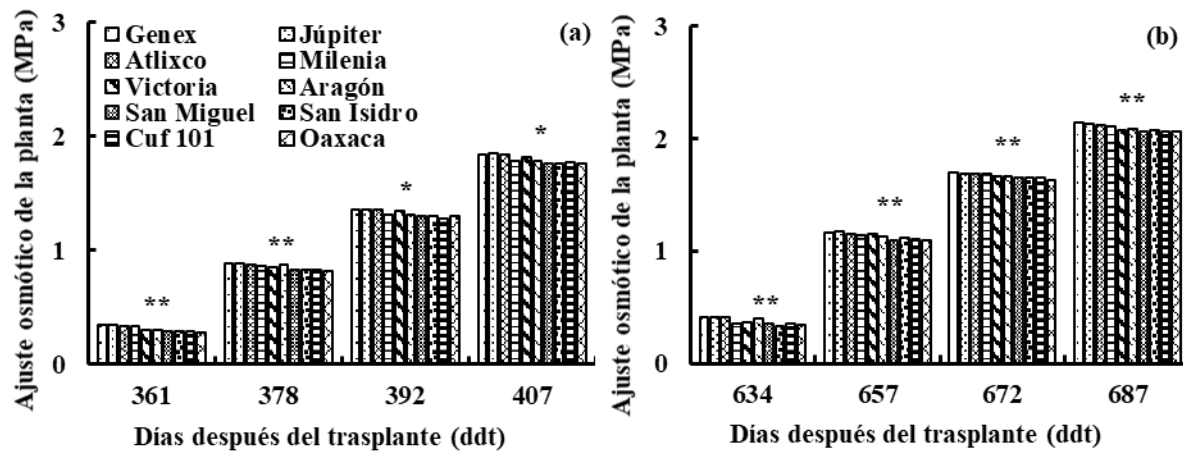


Figura 4.6. Capacidad de ajuste osmótico de la planta en S_1 (a) y S_2 (b) y sus respectivos periodos de riego (R_1 y R_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

2.3.5 Relaciones de intercambio gaseoso

La tasa de A , E y g en riego (R_1 y R_2) fueron más altas que en sequía (S_1 y S_2) en promedio de todos los genotipos (Figuras 4.7a, b y c, 4.8a, b y c; Cuadro B4 y 5), mientras W en riego fue más baja que en sequía (Figuras 4.7d y 4.8d, Cuadro B4 y 5). En S_1 (déficit hídrico del suelo de los 345 a 406 ddt) la A , E y g disminuyeron a $4.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0.022 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con respecto a los valores observados al inicio del tratamiento de sequía ($A=15.3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 3.6 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $g = 0.133 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figuras 4.7a, b y c; Cuadro B4) y la W aumentó de 0.0043 a $0.0058 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ (Figura 4.7d; Cuadro B4). En S_2 (620-688 ddt), la tasa de A , E y g disminuyeron a $4.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0.019 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $0.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con respecto a los valores observados al inicio del tratamiento de sequía ($A=12.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $E = 2.8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y $g = 0.100 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figuras 4.8a, b y c; Cuadro B5), y la W aumentó de 0.0046 a $0.0061 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$ (Figuras 4.8d; ; Cuadro B4). La alfalfa se considera una especie altamente sensitiva a la sequía, especialmente en las etapas vegetativa y reproductiva, cultivada en áreas secas es moderadamente tolerante a la sequía, pero en

condiciones de estrés hídrico severo sufre pérdidas considerables de la producción; los principales efectos del estrés hídrico se manifiestan en una reducción en la germinación y crecimiento, daños severos en el aparato fotosintético y disminución en la fotosíntesis neta, y absorción de nutrientes (Nadeem *et al.*, 2019). Otro estudio realizado en condiciones de invernadero con varios genotipos de alfalfa anual (*Medicago truncatula* y *Medicago lacinata*), sometidos a sequía durante 24 días, determinaron que el déficit hídrico del suelo redujo el peso seco total, la tasa de asimilación, conductancia estomática y contenido relativo de agua, y estos cambios estuvieron asociados con un aumento en la concentración de Malondialdehído; el cultivar MI-173 tolerante a la sequía mostró una disminución más pronunciada del potencial osmótico (-1.6 MPa) y una menor reducción en el contenido de agua debido a la acumulación de solutos como prolina, azúcares solubles y potasio (Yousfi *et al.*, 2010). Las diferencias que se manifiestan en el potencial osmótico y la capacidad de ajuste osmótico determinadas entre el presente estudio (Genex y Jupiter $\pi=-3.35$ MPa, Atlixco $\pi=-3.33$ MPa en S₁; Genex $\pi=-3.52$ MPa en S₂) y los datos de Yousfi *et al.* (2010), pueden deberse a que la mayor duración del periodo de sequía impuesto en las plantas del presente estudio (S₁=62 y S₂=68 días) y las plantas del estudio de Yousfi *et al.* (2010) (24 días) haya permitido a las plantas mantener más bajos potenciales ψ y π , y mayor capacidad de ajuste osmótico que en el cultivar MI-173 considerado como tolerante a sequía debido a las diferencias en la duración e intensidad de la sequía.

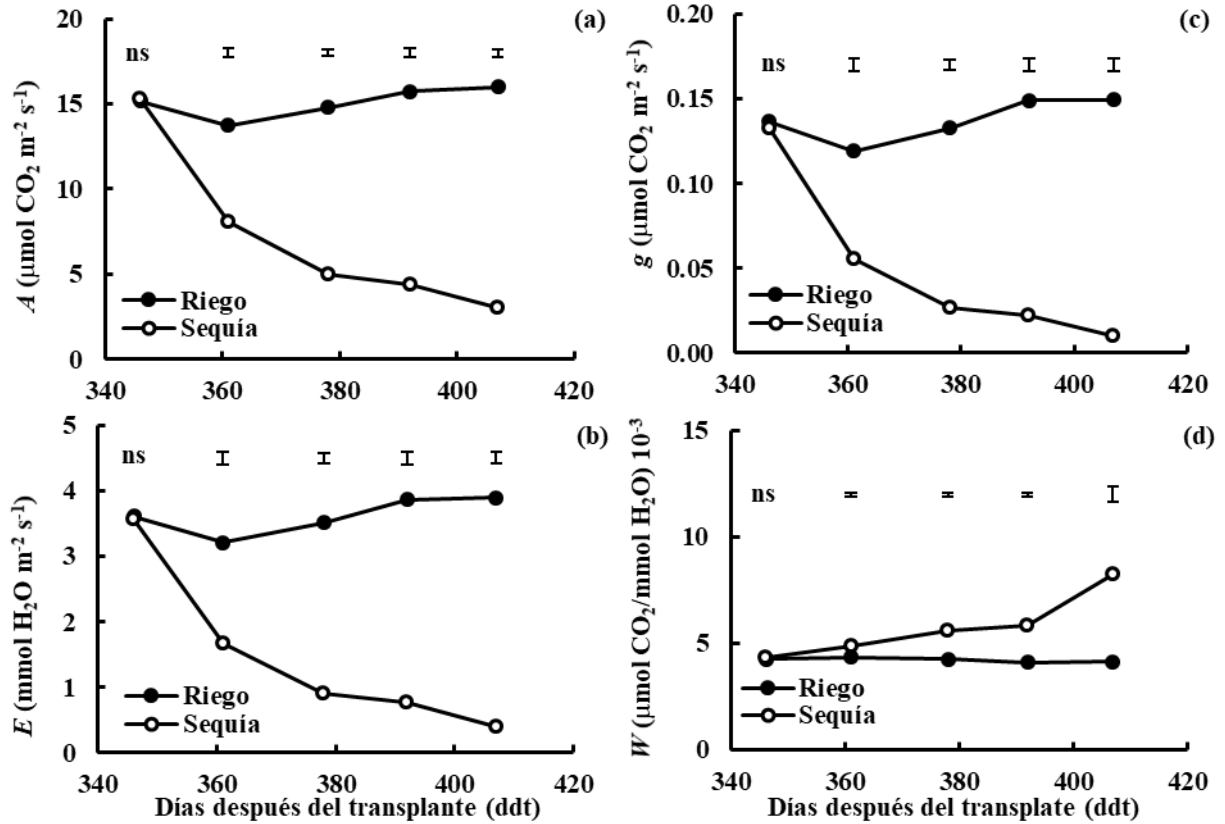


Figura 4.7. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R_1) y sequía (S_1) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

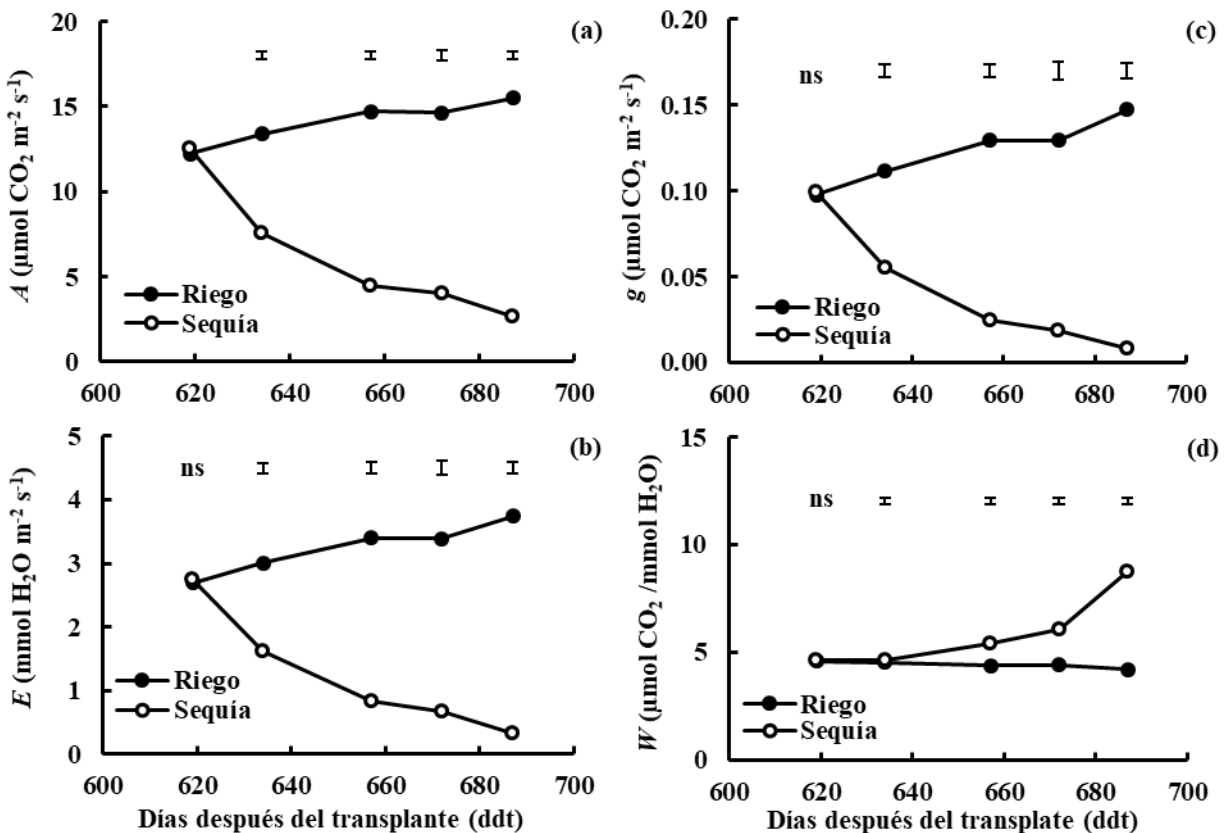


Figura 4.8. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R_2) y sequía (S_2) en promedio de 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

En S_1 el déficit hídrico del suelo disminuyó significativamente la tasa de A , E y g en todos los genotipos desde los 361 ddt, alcanzando sus valores más bajos al finalizar el tratamiento de sequía (407 ddt) (Figuras 4.9a, b y c; Cuadro B4). La W aumentó desde los 361 ddt hasta alcanzar su valor más alto a los 407 ddt (Figura 4.9d; Cuadro B4). La variedad Milenia mostró los valores más altos de A los 361, 392 y 407 ddt (Figura 4.9a; Cuadro B4); E a los 361, 378, 392 y 407 ddt (Figura 4.9b; Cuadro B4) y g a los 361, 378, 392 y 407 ddt (Figura 4.9c; Cuadro B4). La variedad Genex tuvo valores altos de A , E y g a los 378 ddt (Figura 4.9a, b y c; Cuadro B4). La variedad Oaxaca mostró valor alto para W a los 361 y 407 ddt (Figura 4.9d; Cuadro B4). La variedad Aragón tuvo alto valor para W a los 378 ddt y la variedad Cuf 101 mostró alto valor para W a los 392 ddt (Figura 4.9d; Cuadro B4). La variedad Júpiter tuvo A similar a Milenia a los 361 ddt; la variedad Milenia tuvo A

similar Genex a los 378 ddt; las variedades Genex y Júpiter tuvieron *A* similar a Milenia a los 392 ddt y 407; las variedades Genex y Júpiter fueron similares a Milenia en *E* a los 361, 392 y 407 ddt; y la variedad Júpiter fue similar a Genex y Milenia en *E* a los 378 ddt (Figura 4.9b; Cuadro B4). Las variedades Genex y Júpiter fueron similares a Milenia en *g* a los 361, 392 y 407 ddt; la variedad Júpiter fue similar en *g* a Genex y Milenia a los 378 ddt (Figura 4.9c; Cuadro B4). La variedad Cuf 101 fue similar a Oaxaca en *W* a los 361 ddt; la variedad San Miguel tuvo una *W* similar a Aragón a los 378 ddt, la variedad Aragón fue similar en *W* a Cuf 101 a los 392 ddt, y la variedad Victoria tuvo una *W* similar a Oaxaca a los 407 ddt (Figura 4.9d; Cuadro B4).

En S_2 la tasa de *A*, *E* y *g* disminuyeron significativamente desde los 634 a los 687 ddt, alcanzando sus valores más bajos al finalizar el tratamiento de déficit hídrico (Figuras 4.10a, b y c; Cuadro B5), mientras la *W* aumentó significativamente desde los 657 ddt hasta alcanzar su valor más alto a los 687 ddt (Figura 4.10d; Cuadro B5). La variedad Milenia mostró los valores más altos para *A*, *E* y *g* a los 634, 657, 672 y 687 ddt; la variedad Genex tuvo valores altos para *A*, *E* y *g* a los 672 y 687 ddt (Figuras 4.10a, b y c; Cuadro B5). La variedad San Isidro mostró el valor más alto para *W* a los 657 ddt; la variedad CUF 101 tuvo un alto valor de *W* a los 672 ddt y la variedad San Miguel mostró valor alto para *W* a los 687 ddt (Figura 4.10d; Cuadro B5). La variedad Genex mostró valores de *A*, *E* y *g* similares a Milenia a los 634 (Figuras 4.10a, b y c; Cuadro B5); Júpiter tuvo *A* similar a Milenia a los 657 ddt; las variedades Júpiter, Atlixco y Oaxaca mostraron *A* similar a Genex y Milenia a los 672 ddt; y las variedades Júpiter y Oaxaca tuvieron *A* similar a Genex y Milenia a los 687 ddt (Figura 4.10a; Cuadro B4). Las variedades Júpiter, Genex, Atlixco y Oaxaca tuvieron *E* similar a Milenia a los 657 ddt (Figura 4.10b; Cuadro B5). Las variedades Júpiter y Genex tuvieron *g* similar a Milenia a los 657 ddt (figura 4.10c; Cuadro B4); y la variedad Atlixco mostró *E* y *g* similares a Genex y Milenia a los 672 y 687 ddt (Figuras 4.10b y c; Cuadro B4). La variedad Victoria tuvo una *W* similar a Cuf 101 a los 672 ddt y a San Miguel a los 687 ddt (Figura

4.10d; Cuadro B5). Abid *et al.*, (2016a) observaron que el déficit hídrico del suelo redujo severamente la tasa neta de asimilación, conductancia estomática, eficiencia en el uso del agua, contenido relativo del agua, área foliar y contenido de clorofilas a y b en varias poblaciones de alfalfa, con un aumento en la eficiencia en el uso del agua y concentración interna de CO₂; adicionalmente, determinaron que la población más tolerante a sequía redujo al máximo su área foliar y mantuvo los más altos valores para la eficiencia en el uso el agua.

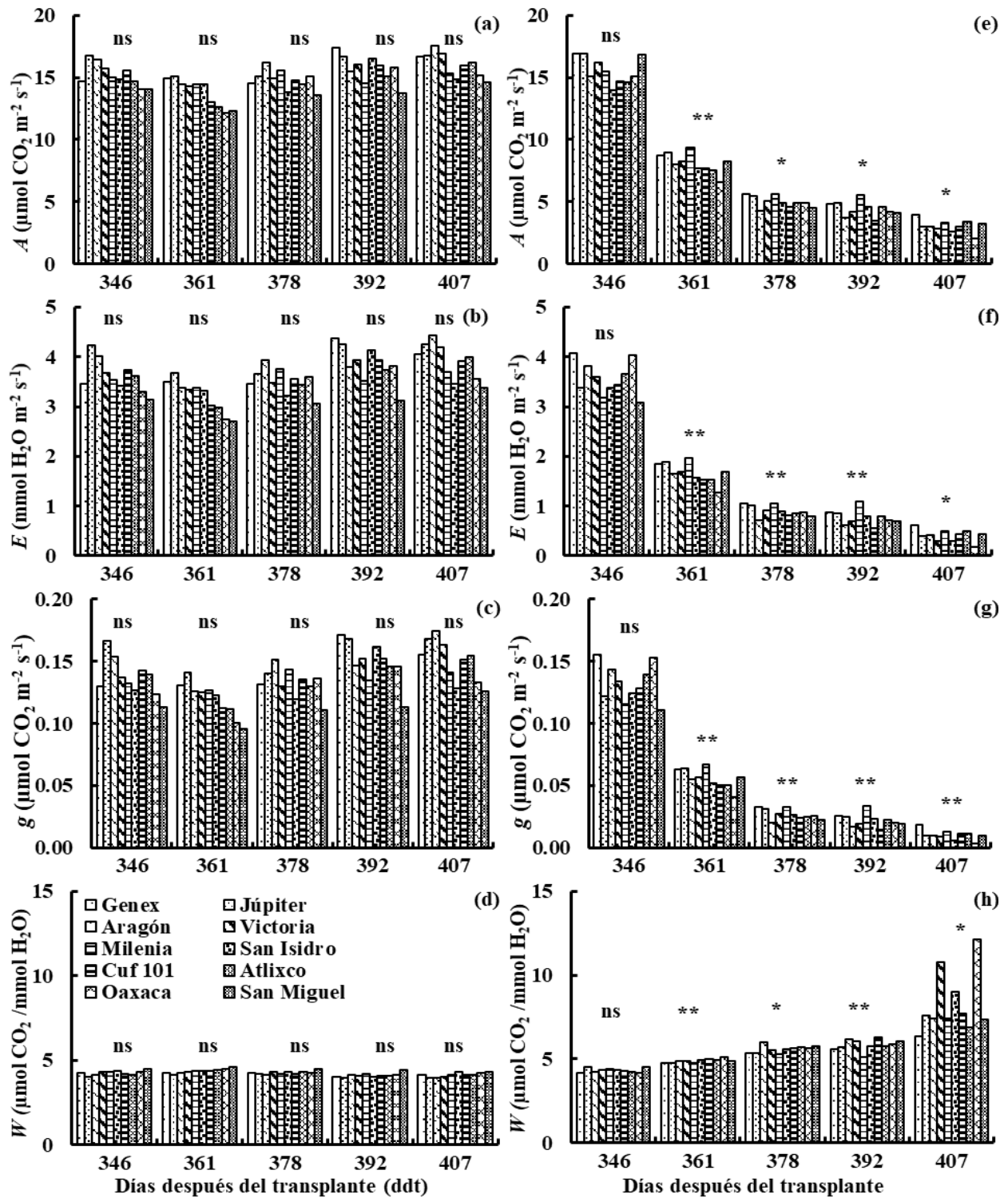


Figura 4.9. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R₁) y sequía (S₂) (e, f, g y h), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

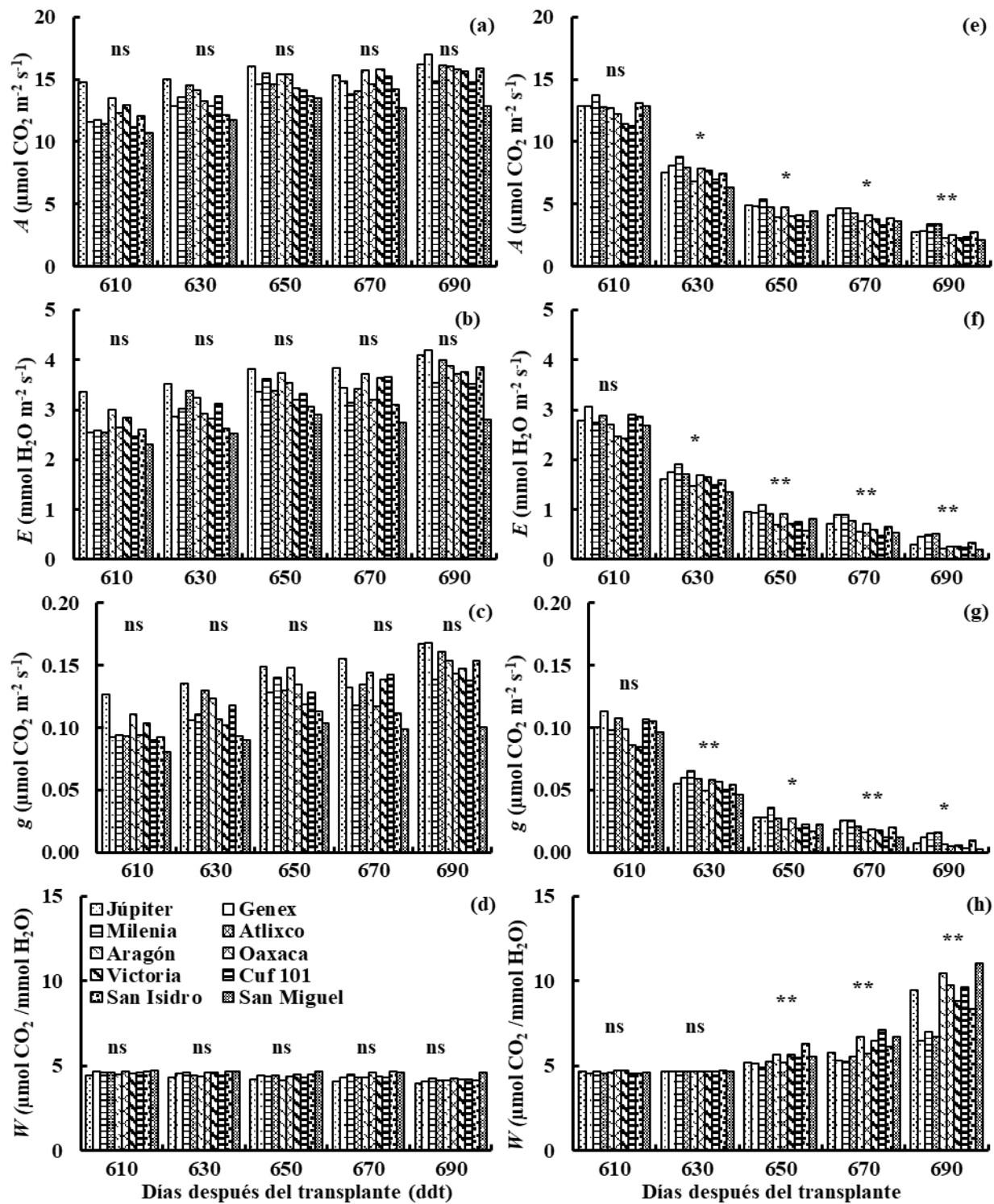


Figura 4. 10. Tasa de asimilación neta (a), tasa de transpiración (b), conductancia estomática (c) y eficiencia en el uso del agua (d) en riego (R₁) y sequía (S₂) (e, f, g y h), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

2.4 CONCLUSIONES

Los mecanismos genético-fisiológicos que determinan el ajuste osmótico y la actividad fotosintética y transpirativa de la planta contribuyen a mantener la actividad de los procesos fisiológicos y metabólicos de la alfalfa en condiciones de déficit hídrico. Las deficiencias hídricas del suelo redujeron los potenciales hídrico y osmótico a niveles que favorecieron una alta acumulación activa de solutos en la célula o ajuste osmótico, lo que permitió que la planta lograra mantener niveles de turgencia favorables para el intercambio gaseoso (moléculas de CO₂/moléculas de H₂O) del área foliar; las variedades que desarrollaron mayores niveles de ajuste osmótico, asimilación, transpiración y conductancia estomática mostraron mejor comportamiento y tolerancia al estrés hídrico. Estas características genético-fisiológicas tienen implicaciones muy significativas para el mejoramiento de la resistencia a sequía, al identificar los caracteres de la planta que podrían ser útiles, para una selección más práctica y eficaz bajo condiciones de estrés hídrico en alfalfa.

2.5 LITERATURA CITADA

- Abid, M., E. Mansour, A. B. Khaled, Kh. D. Bachar, L. Ben Yahya and A. Ferchichi. 2016. Induced osmotic adjustment in alfalfa plants confers tolerance to water stress. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 22(3): 415-425.
- Abid, M., M. Haddad, A. Ben Khaled, E. Mansour, K. Bachar, B. Lacheheb, A. Ferchichi. 2016a. Water relations and gas exchange in alfalfa leaves under drought conditions in southern Tunisian oases. *Polish Journal of Environmental Studies* 25(3):917-924.
- Anicchiarico, P., L. Pecetti and A. Tava. 2012. Physiological and morphological traits associated with adaptation of lucerne (*Medicago sativa*) to severely drought-stressed and to irrigated environments. *Annals of Applied Biology* 162 (20):27-40. Doi:10.1111/j.1744-7348.2012.00576.x
- Barrios-Gómez, E.J., C. López-Castañeda y J. Kohashi-Shibata. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agronomía Costarricense* 35(1):131-145.

- Begg, J. E. and N.C. Turner. 1976. Crop water deficits. *Advances in Agronomy* 28:161-217.
- Blum, A. 2015. Stress, strain, signaling, and adaptation – not just a matter of definition. *Journal of Experimental Botany* 67(3):562-565.
- Erice, G., S. Louahlia, J.J. Irigoyen, M. Sánchez-Díaz and J.C. Avice. 2010. Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Journal of Plant Physiology* 167(2):114–120.
- Fahad, S., S. Hussain, A. Matloob, F.A., Khan, A. Khaliq, S. Saud, et al. 2015. Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant Growth Regulation* 75 (2):391–404. Doi: 10.1007/s10725-014-0013-y
- Farquhar, G.D. 1991. Use of stable isotopes in evaluating plant water use efficiency. In: *Proceedings series of the International symposium on the use of stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies, organized by the International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria) and the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy). Vienna, Austria, 1-5 October, 1990. Pp: 475-488.*
- Grimes, D.W., P.L. Wiley, and W.R. Sheesley. 1992. Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. *Crop Science* 32:1381-1387.
- Harrison, M.T., F. Tardieu, Z. Dong, Z., C.D. Messina and G.L. Hammer. 2014. Characterizing drought stress and trait influence on maize yield under current and future conditions. *Global Change Biology* 20(3):867-878. Doi:10.1111/gcb.12381
- He, S., G. Liu, and H. Yang. 2012. Water use efficiency by alfalfa: Mechanisms involving anti-oxidation and osmotic adjustment under drought. *Russian Journal of Plant Physiology* 59(3):348-355.
- López-Castañeda, C. 1993. Eficiencia en el uso del agua y discriminación de carbono en cereales. *Agrociencia* 4(4): 7-32.
- Morgan, J. M. 1995. Growth and yield of wheat lines with differing osmoregulative capacity at high soil water deficit in seasons of varying evaporative demand. *Field Crops Research* 40:143-152.
- Morran, S., O. Eini, T. Pyvovarenko, B. Parent, R. Singh, A. Ismagul, et al. 2011. Improvement of stress tolerance of wheat and barley by modulation of expression of DREB/CBF factors. *Plant Biotechnology J.* 9(2):230–249. Doi: 10.1111/j.1467-7652.2010.00547.x
- Nadeem, M., J. Li., M. Yahya., A. Sher., C. Ma., X. Wang and L. Qiu. 2019. Research progress and perspective on drought stress in legumes: A review. *International Journal of Molecular Sciences* 20(1):1-32.
- Orloff, S. 2015. Drought strategies for alfalfa. University of California, Agriculture and Natural Resources, Publication 8522, July 2015. <http://anrcatalog.ucanr.edu>
- Pembleton, K.G., R.P. Rawnsley, D.J. Donaghy and J.J. Volenec. 2009. Water deficit alters canopy structure but not photosynthesis during the regrowth of alfalfa. *Crop Science* 49:722–731.

- Perdiguero, P., Á. Soto and C. Collada. 2015. Comparative analysis of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* dehydrins under drought stress. *Tree Genetics & Genomes* 11:70. Doi: 10.1007/s11295-015-0899-1
- Sheaffer, C.C., C.B. Tanner, M.B Kirkham. 1988. Alfalfa water relations and irrigation. In: A.A. Hanson, D.K. Barnes and R.R. Hill, Jr. (eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. Madison, WI, USA: ASA-CSSA-SSSA. Pp. 373–409.
- Sim, R.E., H.E. Brown, E.I. Teixeira and D.J. Moot. 2017. Soil water extraction patterns of lucerne grown on stony soils. *Plant Soil* 414:95-112. Doi 10.1007/s11104-016-3112-x
- Slama, I., S. Tayachi, A. Jdey, A. Rouached and C. Abdelly. 2011. Differential response to water deficit stress in alfalfa (*Medicago sativa*) cultivars: Growth, water relations, osmolyte accumulation and lipid peroxidation. *African Journal of Biotechnology* 10(72):16250-16259.
- Yousfi, N., I. Slama, T. Ghnaya, A. Savouré and C. Abdelly. 2010. Effects of water deficit stress on growth, water relations and osmolyte accumulation in *Medicago truncatula* and *M. Laciniata* populations. *Comptes Rendus Biologies* 333:205-213.
- Zhang C., S. Shi., Z. Liu., F. Yang and G. Yin. 2019. Drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties is associated with enhanced antioxidative protection and declined lipid peroxidation. *Journal of Plant Physiology* 232:226-240.
- Zhao, P., P. Liu, G. Yuan, J. Jia, X. Li, D. Qi, S. Chen, T. Ma, G. Liu and L. Cheng. 2016. New insights on drought stress response by global investigation of gene expression changes in Sheepgrass (*Leymus chinensis*). *Frontiers in Plant Science* 7:954. Doi: 10.3389/fpls.2016.00954.

**CAPITULO III. EVAPOTRANSPIRACIÓN, TRANSPIRACIÓN, EFICIENCIA
TRANSPIRATORIA Y MATERIA SECA DE RAÍCES EN ALFALFA BAJO RIEGO Y
SEQUÍA**

3.1 INTRODUCCIÓN

La alfalfa es un cultivo típico de riego en México y los Estados Unidos de América (EE.UU.), con grandes aéreas, que además de tener riego, dependen de la humedad atmosférica durante la temporada de lluvias. En los EE.UU. más del 90 % de los cultivos de alfalfa se producen bajo condiciones de riego con sistemas de irrigación establecidos, para hacer una aplicación de agua altamente eficiente (Hanson *et al.*, 2007). Por el contrario en México, la aplicación de agua en los cultivos de alfalfa se hace por gravedad, con pérdidas significativas de agua en la conducción a través de canales de tierra. En estas condiciones se requieren métodos de riego que ayuden a hacer un uso más eficiente del agua y que contribuyan a maximizar la evapotranspiración o bien, la formación de nuevas variedades de alfalfa, con atributos genético-fisiológicos de mayor eficiencia en el uso del agua y con un desarrollo del área foliar más rápido que ayude a maximizar la evapotranspiración del cultivo (E_T) y el rendimiento de materia seca.

La evapotranspiración (E_T) o cantidad de agua utilizada por el cultivo o una planta individual en una maceta tiene dos componentes; uno es la evaporación o transpiración de la planta (E) o el cultivo, y el otro componente es la evaporación directa de la superficie del suelo (E_s). La E_T a su vez, se considera un componente importante del crecimiento de las plantas y el impacto del déficit hídrico puede ser visto claramente en la reducción de la biomasa y el rendimiento (Hatfield, 1990). En ambientes áridos y semiáridos, el rendimiento de materia seca y beneficio económico que produce el cultivo dependen de la cantidad de agua utilizada o E_T ; la E_T es afectada por el clima, el genotipo y el contenido de humedad en el suelo; los factores de clima incluyen la radiación solar,

temperatura del aire, velocidad del viento y humedad, con la radiación solar como el factor más importante, al proveer la energía para evaporar el agua (Hanson *et al.*, 2007). La E_T será pequeña para plantas con dosel vegetal pequeño (p. ej., justo después del corte) y consistirá en más evaporación al, tener el suelo más expuesto a los rayos del sol, y al aumentar el tamaño del dosel, la ET desarrolla una mayor transpiración, debido a que un dosel maduro de la planta cubre más el suelo, reduciendo la evaporación, No obstante, la insuficiencia de humedad en el suelo disminuye la E_T (Hanson *et al.*, 2007).

La transpiración (E) es un proceso especializado, ya que la pérdida de agua se genera en las paredes de las células epidérmicas dentro de la hoja y las variaciones del ambiente la hacen más complicada; los gradientes de temperatura dentro de la hoja pueden alterar los sitios de evaporación (Sinclair, 1990). La iluminación de la superficie de la hoja puede causar variación en los gradientes de temperatura de la lámina foliar e influir en la distribución de los sitios de evaporación; en muchas condiciones la conductancia al vapor de agua dentro de las hojas es muy grande y por lo tanto la principal restricción a la salida de vapor de agua es a través de los poros estomáticos (Sheriff, 1977).

La evaporación directa de la superficie del suelo (E_S) es el otro factor importante en las relaciones hídricas entre la planta y el suelo; la E_S en ambientes áridos y semiáridos, sujetos a amplias variaciones en la disponibilidad de humedad, puede representar de 40 a 50 % de la E_T , e incluso puede ser mayor (Cooper *et al.*, 1983). Esto puede ocurrir p. ej., en ambientes con clima Mediterráneo, donde la lluvia ocurre durante el invierno cuando el índice de área foliar es bajo y la superficie del suelo está expuesta a la radiación y la turbulencia del aire que acelera la evaporación (López-Castañeda y Richards, 1994).

La eficiencia en el uso del agua (EUA, biomasa producida por unidad de agua evapotranspirada por la planta) es un concepto introducido hace más de 100 años por Briggs y Shantz (1913), mostrando una relación entre la productividad y la cantidad de agua utilizada por la planta. Desde entonces ha habido un incontable número de artículos originales y revisiones publicadas en este tópico, mostrando que la productividad en diversas especies cultivadas, incluyendo alfalfa, es posible aumentarla sin cambios en la cantidad de agua utilizada o E_T , siendo este aspecto una observación crítica, debido a que la corriente prevaleciente en este tema, considera que la EUA basada en la productividad de la planta, sólo puede aumentar a expensas de un aumento en E_T (Hatfield y Dold, 2019). La selección de genotipos con un menor requerimiento de agua o mayor EUA representa una alternativa útil para enfrentar las variaciones ambientales y la incidencia frecuente de deficiencias hídricas que reducen la productividad de los cultivos.

La EUA se define como la cantidad de materia seca producida por unidad de agua evapotranspirada (E_T) por la planta; la medición de la E_T en campo es difícil, impráctica y costosa, por lo que se recomienda en su lugar, la medición de la eficiencia transpiratoria, en macetas o tubos largos de PVC que son más fáciles de manejar y permiten una medición más precisa de la transpiración de la planta en condiciones controladas de crecimiento (López-Castañeda, 1993). La eficiencia transpiratoria (ET) se define como la cantidad de carbono asimilado (fotosíntesis) por unidad de agua transpirada (transpiración) por la planta y puede calcularse a nivel de hoja y de planta individual, como la cantidad de materia seca producida por unidad de agua transpirada (López-Castañeda, 1993). La manipulación de genes que determinan la ET y factores externos relacionados como el déficit de presión de vapor que influye, en la sensibilidad de la transpiración a la disminución de la disponibilidad de agua en el suelo, pueden ayudar a identificar características de la planta relacionadas con incrementos en el rendimiento (Vadez *et al.*, 2014). Para entender como

la EUA o la ET podrían ser afectadas por el cambio climático será necesario determinar cómo el cambio climático impactará el crecimiento y la E_T de la planta. El objetivo de este trabajo de investigación fue estudiar el comportamiento en evapotranspiración, transpiración, eficiencia transpiratoria y desarrollo del sistema de raíces en 10 variedades de alfalfa bajo condiciones de riego y sequía en invernadero.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

La información de localización del sitio experimental, germoplasma utilizado, diseño experimental y tratamientos de humedad edáfica, se presentan en detalle en Materiales y Métodos de los Capítulos 3 y 4.

3.2.1 Variables medidas y calculadas

Rendimiento de materia seca total (RMST, g); se determinó en la última fecha de cosecha de los órganos aéreos de la planta o parte aérea de la planta a los 798 ddt, después de secar el material vegetal en bolsas de papel, colocadas en una estufa durante 48 h a una temperatura de 70 °C.

La E_T , E_S y T se determinaron cada tercer día durante el experimento en todas las unidades experimentales como se indica a continuación:

Evapotranspiración (E_T , kg de agua); se determinó mediante el método gravimétrico con una balanza electrónica marca Tor-Rey, modelo PCR Series, agregando la cantidad de agua utilizada por la planta en cada unidad experimental.

Evaporación directa de la superficie del suelo (E_S , kg de agua); se determinó de manera similar a la E_T , en un tubo de PVC o unidad experimental sin planta, en cada bloque o repetición del experimento.

Transpiración de la planta (T , kg de agua); se calculó como la diferencia entre la cantidad de agua evapotranspirada (E_T) y la evaporación directa del suelo (E_S) ($T = E_T - E_S$).

Eficiencia transpiratoria (ET , g de materia seca/kg de agua transpirada); se calculó al dividir el rendimiento de materia seca entre la cantidad de agua transpirada en cada unidad experimental ($ET = RMS/T$).

Al finalizar el experimento (798 ddt) se realizó un corte final y se midieron y calcularon las siguientes variables:

Peso seco de corona (PSC , g); se cortó la corona de la planta entre la base de los tallos secundarios y la altura de corte (5 cm); las muestras se colocaron en sobres de papel y el peso seco se obtuvo después 48 h a 70 °C.

Peso seco de raíces (PSR , g); se obtuvo al separar las raíces del suelo con unas pinzas de disección en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm de la columna de suelo en cada unidad experimental, una vez que el suelo perdió humedad completamente; las muestras se secaron en una estufa a 70 °C durante 48h.

Peso seco total de raíces ($PSTR$, g); se calculó al sumar el peso seco de raíces obtenido en los cinco estratos de la columna de suelo en cada unidad experimental.

Índice de cosecha (IC); se calculó como el cociente de la suma del rendimiento de materia seca total y el peso seco de la corona entre la suma del rendimiento de materia seca total, el peso seco de corona y el peso seco total de raíces [$IC = (RMST + PSC)/(PSPA + PSC + PSTR)$].

Cociente raíz/parte aérea ($CRPA$); se calculó como el cociente entre el peso seco de la parte aérea o rendimiento de materia seca total ente el peso seco total de raíces ($CRPA = PSTR / PSPA + PSC$).

Los datos de temperatura registrados y contenido de humedad edáfica registrados durante el experimento se consignan en Materiales y Métodos de los Capítulos 3 y 4. También, el modelo estadístico utilizado para el cálculo del análisis de varianza, se indica en Materiales y Métodos de los capítulos anteriores.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Análisis estadístico

El análisis de varianza detectó diferencias ($p \leq 0.01$) entre tratamientos de humedad edáfica para la evapotranspiración (E_T), tasa de transpiración (T), evaporación directa del suelo (E_S) y eficiencia transpiratoria (ET) en los periodos de los 406 a 434 ddt en R_1 y S_1 y de los 462 a 798 ddt en R_2 y S_2 (Cuadro 5.1). También, se detectaron diferencias entre genotipos ($p \leq 0.01$) para E_T , T, E_S y ET en los periodos de 112 a 434 ddt en R_1 y S_1 , y 462 a 798 ddt en R_2 y S_2 . La interacción tratamientos de humedad del suelo*genotipos mostró diferencias ($p \leq 0.01$) para E_T , T, E_S y ET en los periodos de 112 a 210 y de 315 a 434 ddt en R_1 y S_1 , y a los 553, 686, 742 y 770 ddt en R_2 y S_2 ; 112 a 210, y 315 a 406 ddt en R_1 y S_1 , y a los 553, 686, 742 y 798 ddt en R_2 y S_2 ; 112 a 210, y 315 a 434 ddt en R_1 y S_1 , y 742 a 770 ddt en R_2 y S_2 ; y 112 a 210, y 315 a 434 ddt en R_1 y S_1 , y 742 a 770 ddt en R_2 y S_2 (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para la evapotranspiración (E_T), transpiración (T), eficiencia transpiratoria (ET) y rendimiento de

materia seca total (RMST), para 10 variedades de alfalfa bajo riego y sequía. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

FV	GL	Días después del trasplante (ddt)								
		112	140	175	210	245	280	315	406	434
Evapotranspiración (kg de H₂O)										
A	1	0.16ns	0.03ns	0.009ns	0.002ns	0.20ns	0.11ns	0.08ns	638.3**	162.3**
B	9	1.06**	0.53**	1.21**	0.97**	0.80**	1.54**	1.99**	1.05**	1.70**
A*B	9	0.37**	0.22**	0.25*	0.13**	0.10ns	0.14ns	0.38*	0.84**	0.76**
Error	60	0.13	0.04	0.10	0.05	0.12	0.14	0.16	0.18	0.31
		462	490	518	553	588	686	742	770	798
A	1	36.0**	42.8**	50.9**	8.2**	14.7**	1258.3**	89.5**	21.0**	18.5**
B	9	0.92**	1.29**	1.30**	1.7**	0.38**	7.8**	5.1**	1.7**	0.92**
A*B	9	0.17ns	0.33ns	0.23ns	0.45*	0.12	7.7**	1.8**	0.43*	0.21ns
Error	60	0.17	0.26	0.29	0.22	0.10	2.1	0.36	0.16	0.14
Transpiración (kg de H₂O)										
		112	140	175	210	245	280	315	406	434
A	1	0.003ns	0.01*	0.0001ns	0.006ns	0.005ns	0.001ns	0.0006ns	3.7**	3.8**
B	9	0.07**	0.04**	0.02**	0.07**	0.03**	0.07**	0.03**	0.50**	0.049*
A*B	9	0.03**	0.02**	0.005**	0.01**	0.003ns	0.007ns	0.005*	0.47**	0.02ns
Error	60	0.007	0.002	0.002	0.003	0.004	0.007	0.002	0.08	0.02
		462	490	518	553	588	686	742	770	798
A	1	1.7**	1.24**	0.75**	0.14**	0.24**	3.5**	0.81**	0.31**	0.28**
B	9	0.05**	0.04*	0.03*	0.03**	0.007**	1.10**	0.06**	0.03**	0.01**
A*B	9	0.02ns	0.02ns	0.01**	0.009*	0.003ns	0.99**	0.01*	0.006ns	0.002*
Error	60	0.02	0.02	0.01	0.004	0.002	0.18	0.005	0.003	0.001
Evaporación del suelo (kg de H₂O)										
		112	140	175	210	245	280	315	406	434
A	1	3362ns	1624ns	968ns	3741ns	5000ns	5280ns	11760ns	41700**	80ns
B	9	20ns	20ns	10ns	5ns	10.0ns	10.0ns	10.0ns	940.0ns	20ns
A*B	9	9ns	20ns	5ns	10ns	10.0ns	20.0ns	3.0ns	940.0ns	30ns
Error	60	4080	5380	3270	4030	3680	1730	4160	15050	2600ns
		462	490	518	553	588	686	742	770	798
A	1	1200ns	76060ns	30ns	3350ns	1090ns	24670**	3660ns	1230ns	110ns
B	9	360ns	20ns	170ns	460ns	260ns	3380ns	1030ns	280ns	670ns
A*B	9	320ns	20ns	230ns	330ns	140ns	3550ns	3810ns	330ns	220ns
Error	60	1200	1810	1750	6150	2950	19210	1050	1030	3540
Eficiencia transpiratoria (g de MS/kg de H₂O)										
		112	140	175	210	245	280	315	406	434
A	1	0.26ns	0.51ns	0.20ns	0.30ns	0.29ns	0.34ns	0.79ns	2280.9**	910.5**
B	9	6.0**	3.0**	6.6**	5.46**	4.44**	8.60**	10.8**	6.1**	9.1**
A*B	9	2.1**	1.2**	1.4*	0.74**	0.52ns	0.70ns	2.04*	3.0*	4.0*
Error	60	0.63	0.17	0.51	0.25	0.63	0.78	0.95	1.15	1.6
		462	490	518	553	588	686	742	770	798
A	1	178.4**	254.8**	275.1**	50.4**	84.2**	4508.8**	469.2**	108.4**	101.2**
B	9	5.1**	7.1**	7.0**	9.3**	2.1**	52.90**	27.2**	9.4**	5.0**
A*B	9	0.93ns	1.8ns	1.2ns	2.5ns	0.66ns	20.67ns	9.6**	2.3*	1.1ns
Error	60	0.95	1.4	1.5	1.2	0.56	11.0	2.0	0.82	0.68

A=tratamientos de humedad edáfica (R₁=Riego 1; S₁=Sequía 1; R₂=Riego 2; S₂=Sequía 2); B=Genotipos de alfalfa; A*B=Interacción tratamientos de humedad edáfica*genotipos de alfalfa; *(p≤0.05); ** (p≤0.01); ns=No significativo.

Por otro lado, el análisis estadístico detectó diferencias (p≤0.01) entre tratamientos de humedad edáfica para peso seco de raíces determinado en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100

cm, peso seco total de raíces, el peso seco de la corona (PSC), peso seco de la parte aérea, índice de cosecha y cociente raíz/parte aérea (Cuadro 5.2). También, se observaron diferencias ($p \leq 0.01$) entre genotipos y para la interacción tratamientos de humedad del suelo*genotipos para todas las características de la planta antes indicadas (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Factor de variación (FV), grados de libertad (GL) y significancia de los cuadrados medios para el peso seco de la corona (PSC), peso seco de raíces (PSR) en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA) en 10 variedades de alfalfa bajo riego y sequía. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

FV	GL	PSR (g)					PSTR (g)	PSC (g)	PSPA	IC	CRPA
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100					
A	1	132.5**	40.8**	8.8**	5.7**	0.4**	651.6*	94.6**	298.3**	0.4**	2.6**
B	9	9.6**	2.2**	0.5**	0.2**	0.01**	21.8**	23.4**	22.0**	0.01**	0.06**
A*B	9	2.4**	1.2**	0.5**	0.2**	0.004**	4.4**	10.6**	5.8**	0.003**	0.02**
Error	60	0.4	0.4	0.05	0.002	0.0003	0.9	0.4	0.9	0.0004	0.003

A=tratamientos de humedad edáfica (R₁=Riego 1; S₁=Sequía 1; R₂=Riego 2; S₂=Sequía 2); B=Genotipos de alfalfa; A*B=Interacción tratamientos de humedad edáfica*genotipos de alfalfa; *($p \leq 0.05$); ** ($p \leq 0.01$); ns=No significativo.

3.3.2 Comportamiento de los genotipos en riego (R₁ y R₂)

En riego (R₁) se observó que las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Oaxaca mostraron mayor E_T que las demás variedades a los 112, 140, 175, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt; 140, 315 y 406 ddt; 210 y 406 ddt; y 140 y 245 ddt. Asimismo, las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia tuvieron valores de E_T similares a las variedades Genex Atlixco, Júpiter y Oaxaca a los 210, 245, 280 y 434 ddt; 112, 140, 315 y 434 ddt; 280 y 406 ddt; 140, 280 y 406 ddt; y 315 ddt (Figura 5.1a; Cuadro C1). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia exhibieron mayor T que las otras variedades a los 112, 140, 175, 245, 280, 315, 406 y 434 ddt; 140, 315 y 406 ddt; 112, 140, 210 y 406 ddt; 140 y 245 ddt; 140 ddt; y 140 ddt, mientras las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Victoria mostraron una T similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 210 ddt; 112, 210, 245, 280 y 434 ddt; 245, 315 y 434 ddt; 112 y 280 ddt; 112, 210, 280 y 406 ddt; y 140 ddt (Figura 5.1b;

Cuadro C3). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia mostraron mayor ET que las demás variedades a los 112, 140, 187, 210, 245, 280, 315 y 434 ddt; 140, 315 y 434 ddt; 112, 140, 210 y 406 ddt; 140 ddt; 140 ddt; y 140 ddt. También, las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Cuf 101 tuvieron una ET similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 406 ddt; 112, 210, 280 y 406 ddt; 315 ddt; 112, 175 y 245 ddt; 112, 280 y 406 ddt; 140 ddt; y 112 y 434 ddt (Figura 5.1c; Cuadro C5).

En R₂ las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia mostraron mayor E_T que los otros genotipos a los, 490, 553, 686, 770 y 798 ddt; 462, 490, 518, 588 y 742 ddt; 490 y 553 ddt; y 462 y 490 ddt. También, las variedades Genex Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 tuvieron E_T similar a la de las variedades antes indicadas a los 462, 518, 588 y 742 ddt; 686, 742 y 798 ddt; 490, 588, 742 y 770 ddt; 490 y 553 ddt; 588 y 742 ddt; y 742 ddt (Figura 5.1d; Cuadro C1). Los genotipos Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia exhibieron mayor T que las otras variedades a los 490, 553, 686, 770 y 798 ddt; 462, 490, 518, 588 y 742 ddt; 490 y 553 ddt; y 462 y 490 ddt. Asimismo, las variedades Genex, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia tuvieron una T similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia a los 462, 518, 588 y 742 ddt; 686, 742 y 798 ddt; 490, 553, 588, 742 y 770 ddt; 490 y 553 ddt; y 588 y 742 ddt (Figura 5.1e; Cuadro C3). También, se observó que las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Cuf 101 exhibieron mayor ET que las otras variedades a los 490, 518, 553, 686, 742, 770 y 798 ddt; 462, 490, 518, 588, 686 y 742 ddt; 490, 518, 553, 686, 742 y 798 ddt; 686, 742 y 770 ddt; 518, 686, 742 y 798 ddt; 490, 518, 686 y 742 ddt; y 742 ddt, mientras las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 tuvieron una ET similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia, Victoria y Cuf 101 a los 588 ddt; 770 y 798 ddt, 770 ddt;

490 y 518 ddt; 490 y 553 ddt; 462, 588 y 770 ddt; y 770 ddt (Figura 5.1f; Cuadro C5). Anower *et al.* (2017) también observaron variación significativa entre genotipos de alfalfa, para la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento de materia seca en condiciones de riego. Li y Su (2017) al estudiar las respuestas de la alfalfa a diferentes niveles de irrigación, observaron que el riego afectó significativamente a la E_T , rendimiento, calidad del forraje y eficiencia en el uso del agua; adicionalmente determinaron que la E_T y el rendimiento de materia seca aumentaron con el incremento en los niveles de riego con variaciones debidas al genotipo, periodo de crecimiento, variabilidad del clima y las prácticas locales de cultivo.

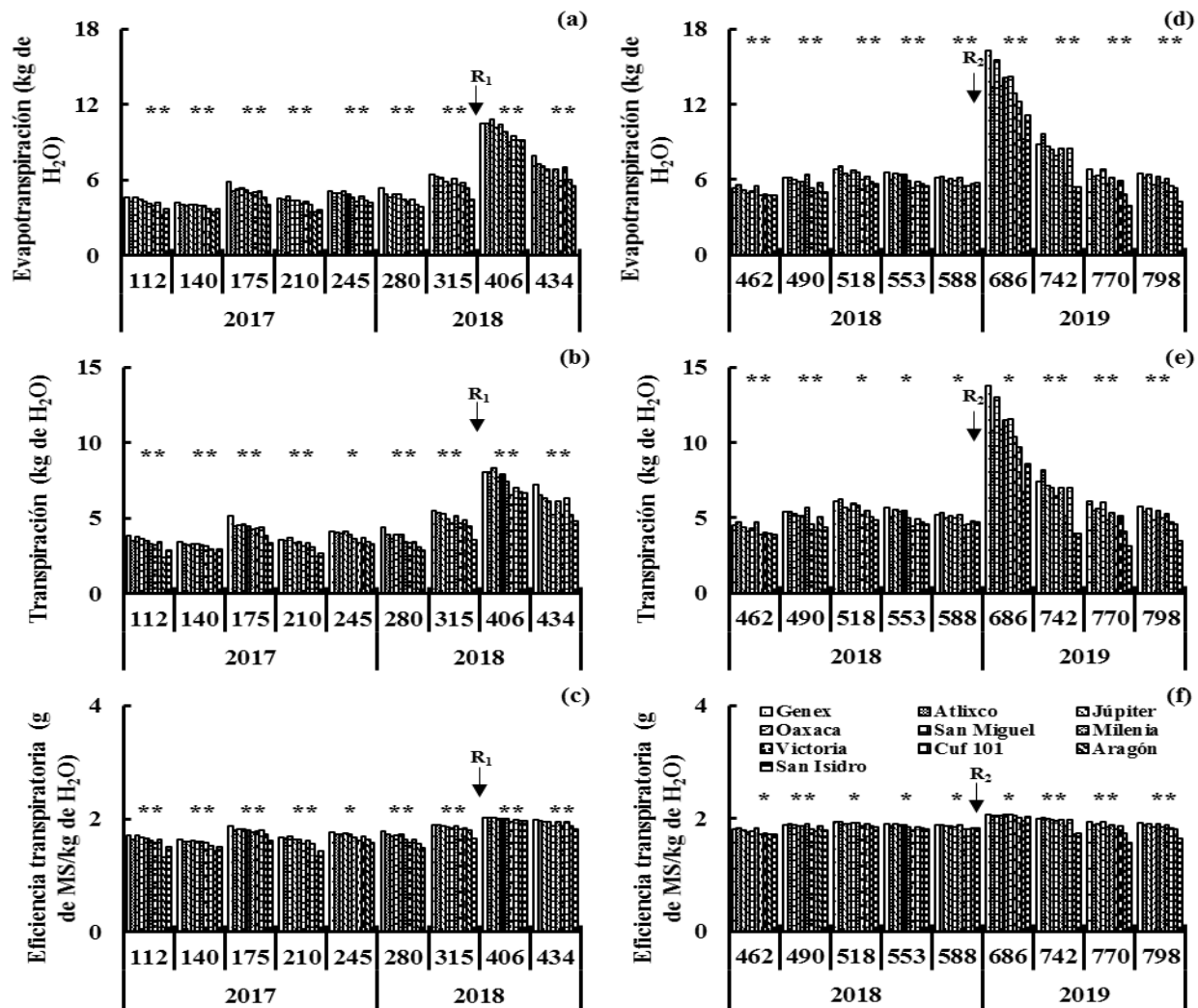


Figura 5.1. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b) y eficiencia transpiratoria (c) en riego (R_1) y evapotranspiración (d), tasa de transpiración (e) y eficiencia transpiratoria (f) en riego (R_2), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

3.3.3 Comportamiento de los genotipos en sequía (S_1 y S_2)

En sequía (S_1) las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia tuvieron mayor E_T que los demás genotipos a los 140, 210, 280 y 315 ddt; 210, 245, 280, 315 y 434 ddt; 112, 210 y 280 ddt; 210, 280 y 406 ddt; 175, 210 y 280 ddt; y 434 ddt. También, las variedades

Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y San Miguel exhibieron valores de E_T similares a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 112, 175 y 434 ddt; 175 ddt; 175, 315 y 434 ddt; 175 y 315 ddt; y 434 ddt (Figura 5.2a; Cuadro C2). También, las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia mostraron mayor T que las otras variedades a los 112, 140, 210, 280, 315 y 434 ddt; 210, 245, 280, 315 y 434 ddt; 112, 175, 210 y 280 ddt; 210, 280 y 406 ddt; 175, 210 y 280 ddt; y 434 ddt, mientras las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Victoria mostraron una T similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel y Milenia a los 175 ddt; 112 y 175 ddt; 315 y 434 ddt; 175 y 315 ddt; 434 ddt; y 280 ddt (Figura 5.2b; Cuadro C4). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y San Miguel exhibieron mayor ET que las otras variedades a los 140, 175, 210, 280, 315 y 406 ddt; 175, 210, 245, 280, 315 y 434 ddt; 112, 175, 210 y 315 ddt; 175, 210 y 315 ddt; 175, 210, 280 y 315 ddt; 175, 210, 280 y 315 ddt; y 434 ddt. Asimismo, las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia, Victoria y Aragón tuvieron una ET similar a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y San Miguel a los 112 y 434 ddt; 406 ddt; 280 y 434 ddt; 245 ddt; 175 y 406 ddt; 315 ddt; y 175, 315 y 406 ddt (Figura 5.2c; Cuadro C6).

En S_2 las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia mostraron mayor E_T que las otras variedades a los 462, 490, 518, 553 y 770 ddt; 490 y 588 ddt; 798 ddt; 686 ddt; y 434, 742 y 770 ddt; las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, Milenia y Cuf 101 tuvieron valores de E_T similares al de las variedades antes indicadas a los 588, 742 y 798 ddt; 518, 553, 742, 770 y 798 ddt; 462, 490, 518, 553, 588, 742 y 770 ddt; 742 ddt; 770 ddt; 518, 553 y 588 ddt; y 490, 588 y 742 ddt (Figura 5.2d; Cuadro C2). Los genotipos Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia tuvieron mayor T que las otras variedades a los 462, 490, 518, 553 y 770 ddt; 490 y 588 ddt; 553 y 798 ddt; 686 ddt; y 742 ddt. También, las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia tuvieron valores de

T similares a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia a los 588, 742 y 798 ddt; 518, 553 y 798 ddt; 462, 490, 518 y 588 ddt; y 518, 553, 588 y 770 ddt (Figura 5.2e; Cuadro C4). Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia tuvieron mayor ET que las demás variedades a los 490, 553, 686 y 770 ddt; 490 ddt; 462 y 798 ddt; y 686, 742 y 770 ddt. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca, San Miguel, Milenia y Cuf 101 mostraron valores de ET similares a las variedades Genex, Atlixco, Júpiter, Oaxaca y Milenia a los 742 y 798 ddt; 462, 553, 686, 742, 770 y 798 ddt; 490, 553, 742 y 770 ddt; 462 y 742 ddt; 770 ddt; 462 y 553 ddt; y 553 ddt (Figura 5.2f; Cuadro C6). Las variedades sobresalientes en condiciones de déficit hídrico disminuyeron su tasa transpiratoria y conservaron mayor cantidad de humedad en el suelo, lo que les permitió sobrevivir a la sequía, mostrando mayor eficiencia transpiratoria y rendimiento de materia seca; al respecto, Sinclair (2018) señala que el cierre parcial de los estomas reduce la tasa transpiratoria y ayuda a conservar agua en el suelo, lo que permite a las plantas mantener la actividad fisiológica durante periodos subsecuentes de sequía y hacer un uso más efectivo del agua a través de la estación de crecimiento. Resultados similares fueron obtenidos por Anower *et al.* (2017), al determinar que las variedades de alfalfa tolerantes a sequia mostraron mayor rendimiento de materia seca y eficiencia en el uso del agua con una menor cantidad de agua utilizada, y que estas variedades con tolerancia a sequía mostraron potencial para utilizarse en condiciones de secano con deficiencias frecuentes de lluvia.

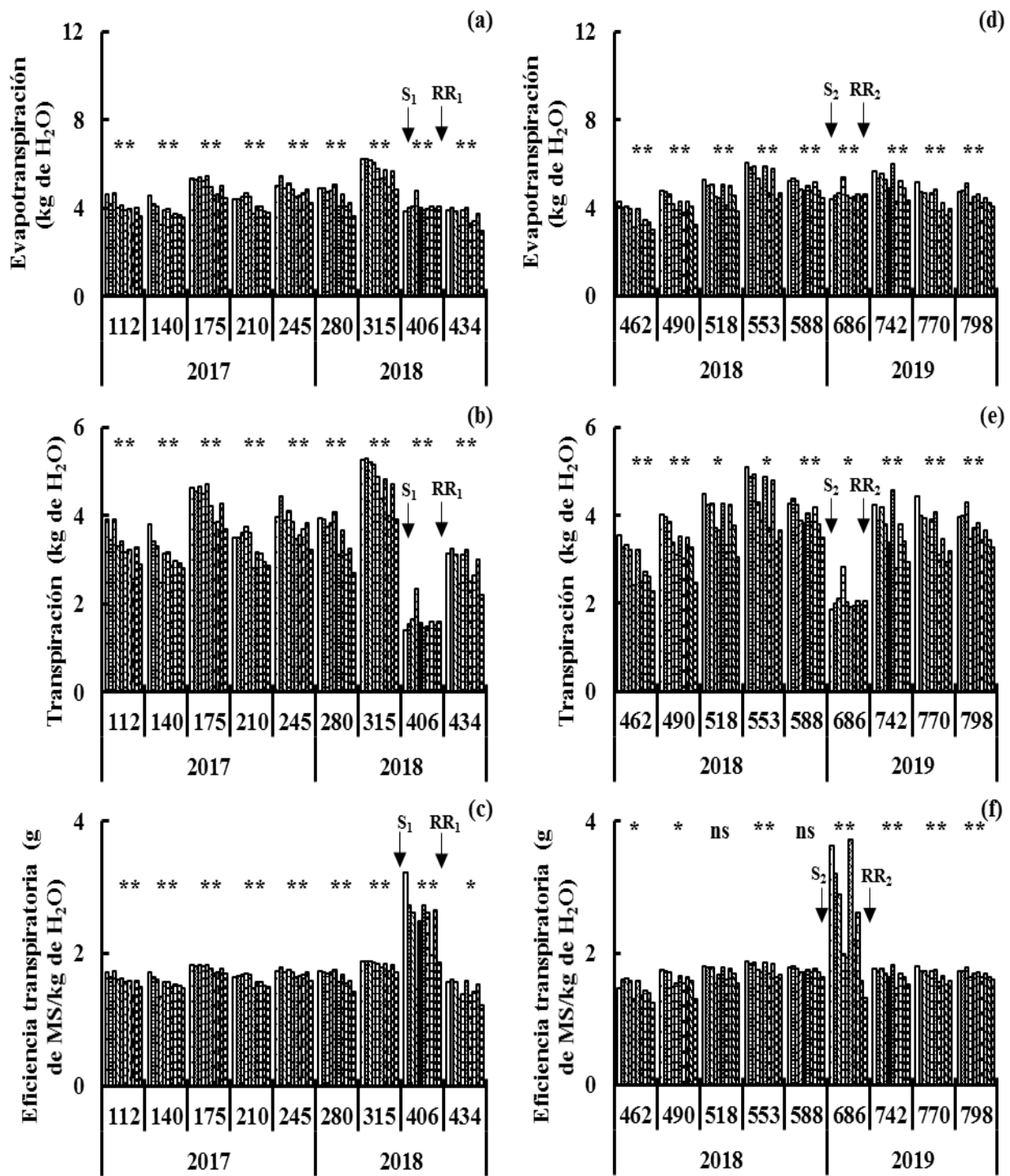


Figura 5.2. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b) y eficiencia transpiratoria (c) en sequía (S₁) y evapotranspiración (d), tasa de transpiración (e) y eficiencia transpiratoria (f) en sequía (S₂), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

3.3.4 Características morfológicas del sistema radical

El tratamiento de sequía promovió mayor acumulación de peso seco en las raíces ($p \leq 0.05$) de todas las variedades de alfalfa; la materia seca acumulada total en las raíces de las plantas bajo sequía fue 67 % mayor ($p \leq 0.05$) que el peso seco de las raíces en riego. La mayor ($p \leq 0.05$) acumulación de materia seca ocurrió en el estrado de 0-20 cm en riego (64 %) y en sequía (56 %). El peso seco de raíces en las plantas sometidas a sequía fue más alto que en riego en todos los estratos del suelo. El peso seco de la corona (PSC), peso seco de la parte aérea de la planta (PSPA) y el índice de cosecha (IC) fueron mayores ($p \leq 0.05$) en plantas de riego (R_1 y R_2) que en las de sequía (S_1 y S_2), mientras el cociente de raíz/parte aérea de la planta (CRPA) fue más alto en sequía que en riego al final del experimento (Cuadro 5.3). El déficit hídrico del suelo afectó la producción de biomasa y la morfología de las raíces en alfalfa; en general las raíces más gruesas redujeron su diámetro más rápidamente que las raíces de menor diámetro cuando el contenido de humedad en el suelo se redujo de 100 % a 25 %; la variedad RS (tolerante a sequía) mantuvo su crecimiento de raíz bajo sequía y mostró un mayor cociente raíz/parte aérea (Anower *et al.*, 2017), lo que le permitió mantener suficiente capacidad de adquisición de agua bajo sequía (Sharp *et al.*, 2004). La diferencia en tolerancia a sequía entre sorgo y alfalfa se relacionó con la capacidad a la recuperación después de la rehidratación, de la conductividad hidráulica de la raíz y la fotosíntesis perdidas por efecto de la sequía, así como la habilidad para regular efectivamente los cambios en la morfología de la raíz para incrementar la eficiencia en el uso del agua (Li *et al.*, 2011).

Cuadro 5.3. Peso seco de corona (PSC), peso seco de raíces (PSR) determinado en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de la parte aérea (PSPA), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para 10 variedades de alfalfa en riego y sequía en invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Variedad	Peso seco de raíces (g)					PSTR (g)	PSC (g)	PSPA (g)	IC	CRPA
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100					
Riego										
Genex	5.5bcd	3.0a	0.7fg	0.2f	0.1bc	9.5bc	12.0de	21.00cde	0.67fg	0.51b
Atlixco	5.7bc	1.8bc	1.7a	0.3e	0.1bc	9.6b	11.8e	21.86bcd	0.69ef	0.45bc
Júpiter	8.4a	2.0b	1.0bc	0.4d	-	11.7a	10.5fg	20.68de	0.63g	0.59 ^a
Oaxaca	6.4b	1.6d	0.7g	0.5b	-	9.1bc	10.3g	19.93e	0.69ef	0.45bc
San Miguel	5.3cde	2.1b	0.9cd	0.2f	0.1c	8.5bcd	12.9cd	21.20cde	0.71de	0.40cd
Milenia	4.8def	1.8c	0.8ef	0.8a	0.1ab	8.2cde	13.6bc	22.83bc	0.73bcd	0.36de
Victoria	4.9cdef	1.5d	0.8de	0.4d	-	7.6def	14.6b	20.03de	0.72cde	0.40cd
Cuf 101	4.2fd	1.3f	0.9d	0.4c	0.2a	6.9f	12.3a	23.01a	0.77a	0.25f
Aragón	4.6efg	1.5d	0.8de	0.3e	0.1c	7.2ef	12.0de	22.95b	0.77ab	0.31ef
San Isidro	3.8g	1.4e	1.0b	0.1g	-	6.3f	11.4ef	20.01de	0.76bc	0.33de
Media	5.4	1.8	0.9	0.3	0.1	8.5	12.6	21.4	0.71	0.39
Sequía										
Genex	10.1a	4.4a	2.3a	1.0b	0.7a	18.5a	11.6b	17.28bc	0.48f	1.10a
Atlixco	8.4b	3.0bcde	1.8bc	0.5e	0.3e	13.9cde	10.8bc	17.73b	0.56bc	0.80cde
Júpiter	9.7a	2.8cde	1.6bcd	1.4a	0.5d	16.0b	13.7a	20.79a	0.55bcd	0.81cd
Oaxaca	7.5bcd	4.4a	1.4cde	1.0b	0.7a	15.1bc	7.9e	13.71e	0.48f	1.09a
San Miguel	7.9bc	2.5de	1.9b	1.0b	0.8a	14.1cd	10.1c	15.76bc	0.52de	0.92bc
Milenia	6.7d	3.4bc	1.8b	0.8c	0.7ab	13.5de	11.6b	14.07ed	0.49ef	1.03ab
Victoria	7.1cd	3.1bcd	1.5bcd	0.5e	0.5d	12.7def	9.2d	14.17de	0.52cde	0.91bc
Cuf 101	7.3cd	3.8ab	1.3de	1.0b	0.6bc	14.0cd	13.4a	20.37a	0.58ab	0.72de
Aragón	7.0cd	2.2e	1.1e	0.7d	0.6cd	11.4f	10.7c	17.51b	0.60a	0.65e
San Isidro	7.7bc	2.5de	1.2e	0.8c	0.3e	12.5ef	9.2d	15.32de	0.55bcd	0.82cd
Media	7.9	3.2	1.6	0.9	0.6	14.2	10.5	16.4	0.54	0.88

En riego la variedad Júpiter, Genex, Atlixco, Milenia y Cuf 101 produjeron mayor peso seco de raíces ($p \leq 0.05$) que las otras variedades en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm (Figura 5.3a), respectivamente. La variedad Milenia mostró un peso seco de raíces similar a la variedad Cuf 101 en el estrato de 80-100 cm. La variedad Júpiter tuvo mayor peso seco total de raíces ($p \leq 0.05$) y cociente raíz/parte aérea que las otras variedades. La variedad Cuf 101 mostró el mayor peso seco de corona, peso seco de parte aérea e índice de cosecha ($p \leq 0.05$) que las demás variedades. La variedad Aragón mostró un índice de cosecha similar a la variedad Cuf 101 (Cuadro

5.3). El rendimiento es más alto en alfalfa en tanto que la E_T aumente con un máximo rendimiento que puede ocurrir cuando se presenta la máxima E_T estacional sin limitaciones de humedad (Hanson *et al.*, 2007). La partición de asimilados al sistema radical de las plantas en condiciones favorables es importante, para asegurar que el número de hojas, tamaño del área foliar, producción de materia seca y asignación de materia seca a las flores y frutos (Anjum *et al.*, 2017). La importancia del índice de cosecha en el mejoramiento del rendimiento ha sido enfatizada en otros estudios, donde se indica que el alto índice de cosecha de la planta en alfalfa tiene potencial para su utilización como criterio de selección para aumentar el rendimiento (Márquez-Ortiz *et al.*, 1999).

En sequía, las variedades Genex y Júpiter mostraron mayor peso seco de raíces ($P \leq 0.05$) en el estrato de 0-20 cm; Genex y Oaxaca tuvieron mayor peso seco de raíz ($P \leq 0.05$) en el estrato de 20-40; Genex mostró mayor peso seco de raíz ($P \leq 0.05$) en el estrato de 40-60; Júpiter tuvo mayor peso seco de raíz ($P \leq 0.05$) en el estrato de 60-80 cm, y Genex, Oaxaca y san Miguel mostraron mayor peso seco de raíz que las otras variedades en el estrato de 80-100 cm (Figura 5.3b). Genex produjo mayor peso seco total de raíces y cociente raíz/parte aérea ($P \leq 0.05$); Júpiter y Cuf 101 mostraron mayor peso seco de corona y peso seco de la parte aérea ($P \leq 0.05$) que las demás variedades. Aragón produjo mayor índice de cosecha ($P \leq 0.05$) que las otras variedades, y Cuf 101 mostró un índice de cosecha similar a Aragón. Oaxaca mostró mayor cociente raíz/parte aérea ($P \leq 0.05$) que las otras variedades (Cuadro 5.3). Otros estudios también han reportado diferencias en el tamaño del sistema radical de alfalfa; los genotipos con mayor tamaño del sistema radical produjeron mayor biomasa de raíces y mayor número de raíces laterales, y el crecimiento y desarrollo de las raíces varió con la edad de las plantas (Yan, 2016). Dos variedades de alfalfa en condiciones de invernadero bajo sequía severa exhibieron alto cociente de raíz/parte aérea y reducción de la biomasa total; los resultados indicaron que la reducción en la pérdida de agua se logró a través de minimizar la

transpiración al tiempo que se redujo la absorción de agua por la raíz y se desarrolló la capacidad de retrasar la senescencia de las hojas con el mantenimiento de la fotosíntesis, características clave para explicar la tolerancia a la sequía de las dos variedades de alfalfa utilizadas en el estudio (Hanson *et al.*, 2015)

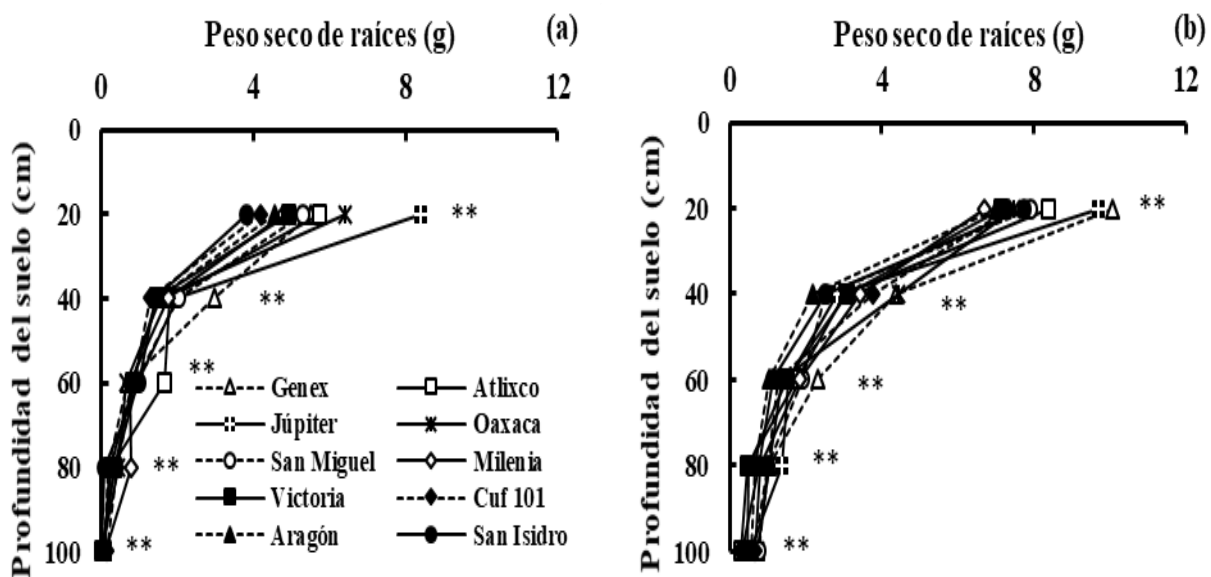


Figura 5.3. Peso seco de raíces en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm en riego (a) y sequía (b), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

3.3.5 Riego vs. sequía

En riego (R_1) la E_T , E_S y T mostraron valores similares a los observados en sequía (S_1) desde los 112 a los 345 ddt; después del riego de recuperación (RR_1 , 345), la E_T , T y E_S en riego (R_1) fueron más altas (ca. 60 %) que las observadas en sequía (S_1) (Figuras 5.4a, b y d; Cuadro C1, 2, 3, 4, 5 y 6). Sin embargo, la E_T tuvo un comportamiento diferente; en riego (R_1) fue similar a la observada en sequía (S_1) desde los 112 a los 345 ddt, pero durante el periodo de déficit hídrico (S_1 , 345-406 ddt) tuvo valores mayores en condiciones de sequía que en riego hasta la aplicación del riego de recuperación (RR_1). A partir de los 406 ddt la E_T en riego fue más alta que en sequía hasta los 620 ddt; y nuevamente durante el segundo periodo de déficit hídrico (S_2 , 620-688 ddt), la E_T en sequía

(S₂) fue más alta que en riego hasta el riego de recuperación (RR₂, 688 ddt). Después del riego de recuperación (RR₂) la ET en riego (R₂) fue más alta que en sequía (S₂) hasta la finalización del experimento (798 ddt) (Figura 5.4c).

La disminución de la ET, T y E_s observada en el tratamiento de sequía del suelo con respecto a riego ha sido señalada en otros estudios en condiciones controladas, donde una menor disponibilidad de humedad en el suelo redujo la absorción de agua o evapotranspiración y la transpiración de la planta, debido a una reducción en el tamaño del área foliar, la tasa fotosintética y apertura estomática que se reflejó en reducciones de 30 a 50 % en la producción de materia seca (Erice *et al.*, 2010).

La alfalfa pudo seguir produciendo materia seca en condiciones de estrés hídrico, sin embargo, su nivel de producción fue inferior al registrado en las plantas bajo riego. Este impacto del déficit hídrico en la producción de materia seca de las variedades de alfalfa pudo deberse a los largos periodos de sequía (S₁=61 y S₂=68 d) a que fueron sometidas las plantas y al confinamiento del sistema de raíces a un volumen de suelo reducido, en el que crecieron en los tubos de PVC utilizados en el experimento. Orloff *et al.* (2015) observaron resultados similares en alfalfa creciendo en condiciones de campo y determinaron que la sobrevivencia de la alfalfa a periodos de sequía depende considerablemente del suelo y el ambiente, pero que la alfalfa generalmente sobrevive periodos cortos de déficit hídrico sin riego y puede recuperarse una vez que tiene disponibilidad de humedad nuevamente para rendir normalmente en años subsecuentes.

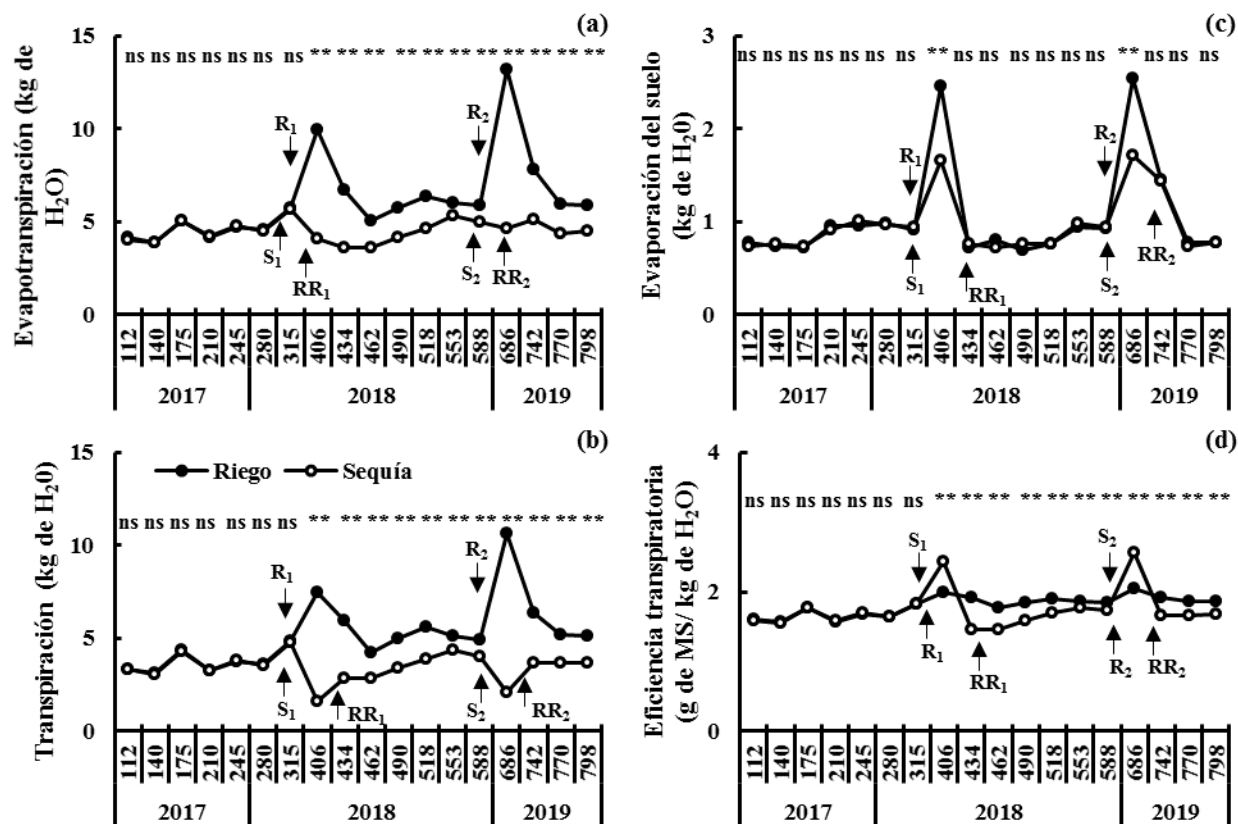


Figura 5.4. Evapotranspiración (a), tasa de transpiración (b), evaporación directa del suelo (c) y eficiencia transpiratoria (d) en riego (R₁ y R₂) y sequía (S₁ y S₂), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

El déficit hídrico del suelo promovió mayor crecimiento de las raíces en todos los estratos del suelo y esto se reflejó en un mayor ($p \leq 0.05$) peso seco total de raíces y cociente de raíces/parte aérea que en riego (Cuadro 5.4). Resultados similares fueron obtenidos por Kang *et al.* (2011) en dos variedades de alfalfa contrastantes en su grado de tolerancia a sequía; la variedad tolerante a sequía produjo mayor crecimiento de raíces después de un tratamiento de déficit hídrico. Pembleton *et al.* (2009) señalaron que las deficiencias hídricas del suelo redujeron el peso seco de la parte aérea y el número de tallos secundarios, y que la acumulación de materia seca en la planta, se redujo proporcionalmente con el nivel del déficit de agua en el suelo; además determinaron que la densidad de tallos y la tasa de fotosíntesis fueron alteradas por la sequía de tal forma que sí el déficit de agua fuera mayor, esto inhibiría el crecimiento de la planta aun después de corregir el

déficit hídrico. Otro estudio de sequía en alfalfa mostró que la selección de genotipos bajo condiciones de déficit hídrico del suelo permitió identificar germoplasma, utilizando a la sobrevivencia de las plantas como índice de selección (Bellague *et al.*, 2016)

El peso seco de corona, peso seco de la parte aérea y el índice de cosecha fueron más altos ($p \leq 0.05$) en riego que en sequía (Cuadro 5.4). Estas características morfológicas de la planta son importantes porque pueden utilizarse como índices de selección en condiciones favorables de humedad; se ha observado que la variación para características de la corona entre genotipos de alfalfa, indica que la selección por caracteres específicos de la corona puede ser efectiva para mejorar el rendimiento de alfalfa (Márquez-Ortiz *et al.*, 1996).

3.3.6 Análisis de componentes principales

En el análisis de componentes principales (CP) para las características determinadas en las plantas de alfalfa bajo riego y sequía indicó que son dos los componentes principales que explican la mayor proporción de la variación total (72.6 %). El CP1 explicó el 55.5 % de la variación total y tuvo correlación positiva con el cociente raíz/parte aérea (37 %), peso seco total de raíces ($r=36$ %), peso seco de raíces en los estratos de 0-20 ($r=32$ %), 80-100 ($r=31$ %) 20-40 ($r=30$ %), 40-60 ($r=29$ %), 60-80 cm de profundidad del suelo ($r=27$ %). Además, mostró correlación negativa con el índice de cosecha ($r=37$ %), el peso seco de la parte aérea ($r=30$ %) y peso seco de la corona (23 %). El CP2 explicó el 17.1 % de variación total y tuvo correlación positiva con la evapotranspiración ($r=63$ %), transpiración ($r=61$ %) y eficiencia transpiratoria ($r=33$ %) (Figura 5.5).

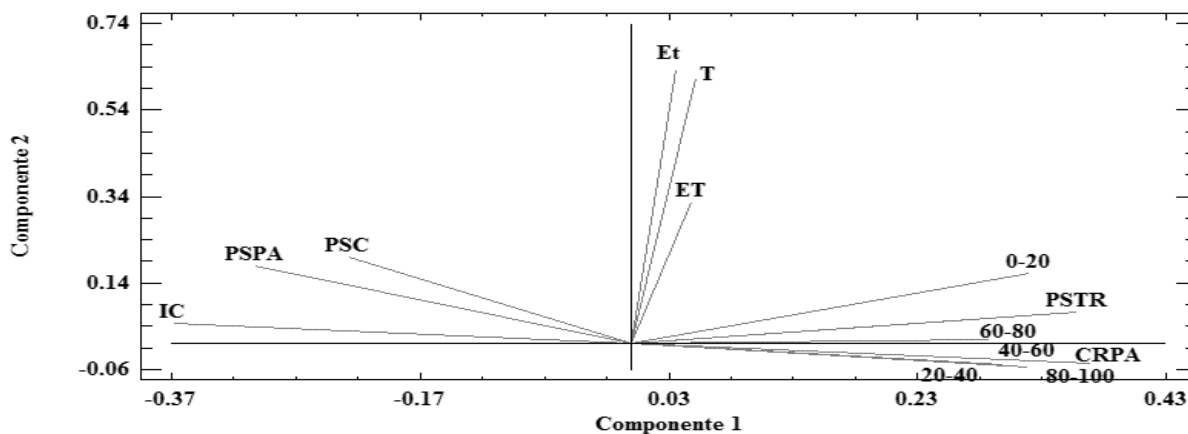


Figura 5.5. Plano biplot para la eficiencia transpiratoria (ET) vs. evapotranspiración (Et), transpiración (T), peso seco de raíz (PSR) en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, peso seco total de raíces (PSTR), peso seco de corona (PSC), peso seco de la parte aérea (PSPA), índice de cosecha (IC) y cociente raíz/parte aérea (CRPA), para 10 variedades de alfalfa en condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

La relación positiva entre la eficiencia transpiratoria y el cociente raíz/parte aérea, peso seco total de raíces, peso seco de raíces en los estratos de 0-20, 80-100, 20-40, 40-60 y 60-80 cm de profundidad del suelo es un indicativo de los atributos de la planta que podrían ser útiles en la selección de genotipos más eficientes en el uso del agua de la alfalfa en condiciones limitantes de humedad edáfica.

3.4 CONCLUSIONES

El déficit hídrico edáfico redujo la evapotranspiración y transpiración de las plantas en los dos periodos de sequía aplicados (S_1 y S_2); las plantas bajo déficit hídrico del suelo no recuperaron su nivel evapotranspiración y transpiración anterior a la aplicación de la sequía. La eficiencia transpiratoria en sequía (S_1 y S_2) fue más alta que en riego (R), y después del riego de recuperación (RR_1), se mantuvo por debajo de riego hasta el final del experimento.

La sequía incrementó el peso seco de raíces en todos los estratos del suelo y esto se reflejó en un mayor peso seco total de raíces y cociente raíz/parte aérea, y redujo el peso seco de corona, peso

de la parte aérea e índice de cosecha. La variedad Genex exhibió mejor comportamiento que las demás variedades; este genotipo fue sobresaliente en eficiencia transpiratoria, peso seco de raíces en los diferentes estratos del suelo, peso seco total de raíces y cociente raíz/parte aérea, y mostró menor evapotranspiración y transpiración que las otras variedades en condiciones de déficit hídrico del suelo.

3.5 LITERATURA CITADA

- Anjum, S. A., U. Ashraf, A. Zohaib, M. Tanveer, M. Naeem, I. Ali, T. Tabassum and U. Nazir. 2017. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. *Zemdirbyste-Agriculture* 104(3):267-276. Doi: 10.13080/z-a.2017.104.034.
- Anower, M. R., A. Boe, D. Auger, I. W. Mott, M. D. Peel, L. Xu , P. Kanchupati and Y. Wu. 2017. Comparative drought response in eleven diverse alfalfa accessions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203:1-13. Doi:10.1111/jac.12156.
- Bellague, D., M. M. Hammedi-Bouzina and A. Abdelguerfi. 2016. Measuring the performance of perennial alfalfa with drought tolerance indices. *Chilean Journal of Agricultural Research* 76(3): 273-284.
- Briggs, L.J. and H.L. Shantz. 1913. The water requirement of plants. 1. Investigations in the great plains in 1910 and 1911. U.S. department of Agriculture, Bureau of Plant Industry – Bulletin No. 284. Washington, D.C. 49 p.
- Cooper, P.J.M., J.D.H. Keatinge and G. Hughes. 1983. Crops evapotranspiration - a technique for calculation of its components by field measurements. *Field Crops Research* 7: 299-312.
- Erice, G., S. Louahlia, J.J. Irigoyen, M. Sánchez-Díaz and J.-Ch. Avice. 2010. Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Journal of Plant Physiology* 167: 114-120.
- Hanson, B.R., K.M. Bali and B.L. Sanden. 2007. Irrigating alfalfa in arid regions. In: C.G. Summers and D.H. Putnam (eds.), *Irrigated alfalfa management in Mediterranean and Desert zones*. Chapter 16. Oakland: University of California Agriculture and Natural Resources Publication 8293. ([http://alfalfa.ucdavis.edu/Irrigated Alfalfa](http://alfalfa.ucdavis.edu/Irrigated%20Alfalfa)).
- Hanson, A., L. Xu, A. Boe, P.S. Johnson, R.N. Gates and Y. Wu. 2015. Identification and characterization of drought-tolerant alfalfa (*Medicago sativa* subsp. *falcata*) germplasm. *Proceedings of the South Dakota Academy of Science* 94: 263-272.
- Hatfield, J.L. and C. Dold. 2019. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 10:103. doi: 10.3389/fpls.2019.00103.

- Hatfield, J.L. 1990. Methods of estimating evapotranspiration. In: B.A. Stewart and D.R. Nielsen (co-eds.), *Irrigation of agricultural crops*. ASA –CSSA –SSSA, Agronomy Monograph No. 30, Madison, WI 53711, USA. Pp: 435-474.
- Kang, Y., Y. Han, I. Torres-Jerez, M. Wang, Y. Tang, M. Monteros and M. Udvardi. 2011. System responses to long-term drought and re-watering of two contrasting alfalfa varieties. *The Plant Journal* 68: 871-889.
- Li, W., S. Zhang, L. Shan and A.E. Eneji. 2011. Changes in root characteristics, gas exchange and water use efficiency following water stress and rehydration of alfalfa and sorghum. *Australian Journal of Crop Science* 5(12): 1521-1532.
- Li, Y. and D. Su. 2017. Alfalfa water use and yield under different sprinkler irrigation regimes in north arid regions of China. *Sustainability* 9:1380; doi: 10.3390/su9081380.
- López-Castañeda, C. 1993. Eficiencia en el uso del agua y discriminación de carbono en cereales. *Agrociencia* 4(4): 7-32.
- López-Castañeda, C. and R.A. Richards. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops research* 39: 85-98.
- Márquez-Ortiz, J.J., L.D. Johnson, D.K. Barnes and D.H. Basigalup. 1996. Crown morphology relationships among alfalfa plant introductions and cultivars. *Crop Science* 36: 766-770.
- Márquez-Ortiz, J.J., L.D. Johnson, D.K. Barnes and J.F.S. Lamb. 1999. Gene action of biomass partitioning in alfalfa during the seedling year. *Agrociencia* 33: 277-284.
- Orloff, S., D. Putnam and K. Bali. 2015. Drought tip 92-33: Drought strategies for alfalfa. ANR Publication 8522, July 2015. <http://anrcatalog.ucanr.edu/> (Consulted on December 9, 2019).
- Pembleton, K.G., R.P. Rawnsley, D.J. Donaghy and J.J. Volenec. 2009. Water deficit alters canopy structure but not photosynthesis during the regrowth of alfalfa. *Crop Science* 49: 722-731.
- Sharp, R. E., V. Poroyko, L. G. Hejlek, W. G. Spollen, G. K. Springer, H. J. Bohnert, and H. T. Nguyen, 2004: Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. *Journal of Experimental Botany* 55, 2343–2351.
- Sheriff, D.W. 1977. Evaporation sites and distillation in leaves. *Annals of Botany* 41:1081-1082.
- Sinclair, T.R. 1990. Theoretical considerations in the description of evaporation and transpiration. In: B.A. Stewart and D.R. Nielsen (co-eds.), *Irrigation of agricultural crops*. ASA –CSSA –SSSA, Agronomy Monograph No. 30, Madison, WI 53711, USA. Pp: 343-361.
- Sinclair, T.R. 2018. Effective water use required for improving crop growth rather than transpiration efficiency. *Frontiers in Plant Science* 9:1442. doi: 10.3389/fpls.2018.01442
- Vadez, V., J. Kholova, S. Medina, A. Kakker and H. Anderberg. 2014. Transpiration efficiency: new insights into an old story. *Journal of Experimental Botany* 65(21): 6141–6153. doi:10.1093/jxb/eru040
- Yan, Z. 2016. Correlation between root trait and yield of alfalfa. *Animal Husbandry and Feed Science* 9 (1): 60-63.

CONCLUSIONES GENERALES

La sequía disminuyó el rendimiento de materia seca total y sus componentes, excepto, la relación hoja:tallo, y también, se redujeron los potenciales hídrico y osmótico a niveles que favorecieron una alto ajuste osmótico, lo que permitió que la planta mantuviera niveles de turgencia favorables para el intercambio gaseoso del área foliar; las variedades que desarrollaron mayores niveles de ajuste osmótico, asimilación, transpiración y conductancia estomática mostraron mejor comportamiento y tolerancia a la sequía. Las deficiencias hídricas en el suelo disminuyeron el rendimiento de materia seca total y sus componentes en comparación con riego y se mantuvieron aún después del riego de recuperación y riegos posteriores.

El déficit hídrico edáfico redujo la evapotranspiración y transpiración de las plantas en los periodos de sequía, las plantas bajo sequía del suelo no recuperaron su nivel evapotranspiración y transpiración anterior a la aplicación de la sequía. La eficiencia transpiratoria en sequía fue más alta que en riego, y después del riego de recuperación. La sequía incrementó el peso seco de raíces en todos los estratos del suelo y esto se reflejó en un mayor peso seco total de raíces y cociente raíz/parte aérea, y redujo el peso seco de corona, peso de la parte aérea e índice de cosecha. Las variedades Genex, Atlixco, Júpiter y Milenia tuvieron mejor comportamiento productivo en condiciones de sequía que las demás variedades, y es recomendable utilizarlas como variedades comerciales en áreas con limitaciones de humedad.

ANEXOS

ANEXO A

Cuadro A1. Rendimiento de materia seca total (g de MS planta⁻¹) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	6.58a	5.66a	9.65a	5.92ab	7.32a	7.87a	10.43a	16.24a	14.36a
Atlixco	5.75ab	5.31a	7.98b	5.73abc	7.01ab	6.75ab	10.17a	16.27a	12.84ab
Júpiter	6.49a	5.21a	8.26b	6.33a	6.87abc	6.17bc	9.93ab	16.85a	12.41ab
Oaxaca	6.2ab	5.32a	8.38b	5.49bcd	7.29a	6.72ab	9.23abc	15.41abc	11.87bcd
San Miguel	5.85ab	5.23a	8.06b	5.63abc	6.73abcd	6.76ab	8.55bc	15.96ab	9.85de
Milenia	5.34bc	5.17a	7.5bc	5.01cd	6.07abcd	5.63bcd	9.66ab	14.81abcd	11.85bcd
Victoria	5.08bc	5.05ab	7.71b	5.44bcd	5.41cd	5.4bcd	8.51bc	12.86d	9.85de
Cuf 101	5.59ab	4.51bc	7.84b	4.81d	6.26abcd	5.63bcd	9.01abc	13.97bcd	12.29abc
Aragón	3.18d	3.87c	6.64c	3.34e	5.59bcd	4.79cd	7.99c	13.23cd	9.90cde
San Isidro	4.39c	4.44bc	5.45d	3.84e	5.26d	4.25d	5.88d	13.11d	8.82e
Media	5.44	4.98	7.75	5.15	6.38	6.00	8.93	14.87	11.4
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	8.12ab	10.28a	11.79ab	10.82a	9.79ab	28.57a	14.74ab	11.75a	10.94a
Atlixco	8.69a	10.28a	12.2a	9.45abc	10.04a	22.25abc	16.48a	10.33abc	10.17abcd
Júpiter	7.74abc	9.96a	10.82abcd	10.52a	9.29abc	26.78ab	14.2ab	10.67abc	10.7ab
Oaxaca	7.21bc	9.64ab	10.59abcde	10.26ab	9.53ab	22.42abc	13.8ab	11.61ab	8.98bcd
San Miguel	7.59abc	9.51ab	11.52abc	10.36ab	9.22abc	23.75abc	12.56b	8.91cde	10.31abc
Milenia	8.59a	10.87a	11.13abcd	9.29abc	9.79ab	23.88abc	13.84ab	10.13abc	9.21abcd
Victoria	6.74c	8.33bc	9.71cde	7.92c	8.21c	21.27abcd	9.51c	8.01de	9.92abcd
Cuf 101	6.99bc	7.38c	10.32bcde	9.06abc	8.33c	19.66bcd	13.83ab	9.54bcd	8.58cd
Aragón	6.81c	9.41ab	9.35de	8.55bc	8.75bc	13.25d	6.79c	7.13e	8.27d
San Isidro	6.69c	7.74c	8.96e	8.31c	8.7bc	17.33cd	6.81c	4.91f	5.73e
Media	7.52	9.34	10.64	9.45	9.17	21.91	12.25	9.3	9.28

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A2. Rendimiento de materia seca total (g de MS planta⁻¹) en riego S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía	S ₁								
Genex	6.73a	6.52a	8.43ab	5.75a	6.92bc	6.83a	9.9ab	4.53a	4.92a
Atlixco	5.66ab	5.6b	8.24ab	5.81a	7.98a	6.77a	9.99a	4.24ab	5.19a
Júpiter	6.78a	5.31bc	8.52a	6.02a	6.68bcd	6.37a	9.81ab	4.28ab	4.84ab
Oaxaca	5.31bc	3.37g	8.1ab	6.35a	7.2b	6.54a	9.64ab	3.43bcd	3.28cd
San Miguel	5.56b	4.93cde	8.62a	6.07a	6.64bcd	7.14a	9abc	3.95abc	4.86ab
Milenia	4.99bc	5.03cd	7.46bc	4.13d	5.74ef	4.88cd	7.84cd	3.97abc	5.14a
Victoria	5.13bc	4.26f	6.58cd	4.98b	5.89e	6.19ab	8.86abc	3.82abcd	3.44bcd
Cuf 101	3.54d	4.56def	6.65cd	4.93bc	6.23de	4.88cd	6.95d	3.19cd	3.77abcd
Aragón	5.24bc	4.43ef	7.61abc	4.46bcd	6.58cd	5.2bc	8.65bc	4.01abc	4.59abc
San Isidro	4.37cd	4.17f	6.26d	4.26cd	5.15f	3.86d	6.74d	2.99d	2.71d
Media	5.33	4.82	7.65	5.28	6.5	5.87	8.74	3.84	4.27
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía	S ₂								
Genex	5.85a	6.98a	8.12a	9.5a	7.6ab	6.71a	7.52ab	7.97a	6.86ab
Atlixco	5.22abc	6.88a	7.54ab	8.98ab	7.86a	6.45a	6.7abc	6.91abc	6.92ab
Júpiter	5.38ab	6.63ab	7.6ab	9.11a	7.49ab	6.08a	7.38abc	6.82abc	7.64a
Oaxaca	5.09abc	5.5abc	6.24abc	7.63bc	6.68abc	5.59ab	6.5abc	5.83cd	5.67cd
San Miguel	3.19d	4.87bcd	6.18bc	6.71cd	6.56bc	3.93bc	5.51cd	6.74bc	6.3bc
Milenia	5.12abc	5.8abc	7.57ab	9.03ab	7.09ab	7.1a	8.32a	7.15ab	6.52bc
Victoria	3.39d	4.66cd	5.34c	6.27cd	6.6bc	4.23bc	4.12d	4.83de	5.66cd
Cuf 101	3.9bcd	5.79abc	7.49ab	8.8ab	7.4ab	5.36ab	6.48abc	5.71cd	6.17bcd
Aragón	3.64cd	5.23abcd	6.42abc	5.59d	6.51bc	3.13c	5.59bcd	4.46e	5.64cd
San Isidro	2.85d	3.34d	4.7c	6.16cd	5.73c	2.71c	4.45d	5.04d	5.26d
Media	4.36	5.57	6.72	7.78	6.95	5.13	6.26	6.15	6.26

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A3. Rendimiento de materia seca de hojas (g de MS planta⁻¹) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	2.55a	2.16a	4.02a	2.25ab	2.98	2.89	4.09a	5.97	5.96
Atlixco	2.26abc	2.02a	3.14bc	2.19ab	2.85	2.42	4.07a	5.84	5.31
Júpiter	2.44ab	2.08a	3.35b	2.44a	2.19	2.34	3.94abc	6.16	5.27
Oaxaca	2.45ab	1.99a	3.3b	2.11bc	2.96	2.63	3.57abc	60	4.93
San Miguel	2.13abc	2.05a	3.23bc	1.98bc	2.63	2.48	3.39bcd	5.46	3.68
Milenia	2.12abc	1.98a	3.17bc	2.06bc	2.57	2.28	3.98ab	6.17	5.13
Victoria	1.99c	2.1a	3.08bc	2.19ab	2.61	2.29	3.5abcd	5.06	4.36
Cuf 101	2.09bc	1.67bc	3.35b	1.88cd	2.57	2.22	3.62abc	5.47	5.33
Aragón	1.35d	1.64c	2.8c	1.37e	2.52	1.99	3.28cd	5.59	4.79
San Isidro	1.93c	1.94ab	2.8c	1.7d	2.52	1.87	2.84d	5.37	4.53
Media	2.13	1.96	3.22	2.02	2.64	2.34	3.63	5.71	4.93
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	3.33	3.81ab	4.69	4.28	3.92	10.9a	6.1a	5.1a	4.45a
Atlixco	3.33	3.61ab	4.58	4.02	4.08	8.15abc	5.91a	3.76bcd	4.15ab
Júpiter	3.02	3.79ab	4.5	4.15	3.83	10.03ab	5.1ab	4.16abc	4.39a
Oaxaca	2.87	3.41bc	4.11	4.3	3.54	8.78abc	5.65a	4.88a	3.27bc
San Miguel	2.82	3.32bc	4.42	4.17	3.85	8.59abc	5.17ab	3.41d	3.69abc
Milenia	3.63	4.22a	4.4	4.33	4.13	10.07ab	5.62a	4.5ab	3.91abc
Victoria	2.86	3.28bc	4.12	3.69	3.51	8.84abc	4.12bc	3.34cd	4.17ab
Cuf 101	2.85	2.81c	4.34	3.61	3.47	7.82abc	5.55a	4.2abc	3.34bc
Aragón	2.88	3.71ab	3.76	4.16	3.76	5.51c	3.03c	3.41bcd	3.58abc
San Isidro	3.15	3.27bc	4.04	3.99	3.94	7.4bc	3.68c	2.86bcd	3c
Media	3.07	3.52	4.29	4.07	3.8	8.61	4.99	3.96	3.79

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A4. Rendimiento de materia seca de hojas (g de MS planta⁻¹) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía	S ₁								
Genex	2.45a	2.34a	3.39	2.34ab	2.68abc	2.56ab	3.85ab	1.92ab	2.25abc
Atlixco	2.21ab	2.14ab	3.32	2.17abc	2.9a	2.54ab	3.93a	1.68bcd	2.32ab
Júpiter	2.54a	2.08b	3.33	2.3abc	2.62bc	2.25bcde	3.98a	1.84abc	2.24abc
Oaxaca	1.95b	1.33e	3.36	2.44a	2.85ab	2.31abcd	3.74ab	1.26e	1.4
San Miguel	2.2ab	1.94bcd	3.43	2.2abc	2.62abc	2.69a	3.47abcd	1.85abc	2.29ab
Milenia	2.07ab	2.06bc	3.13	1.69f	2.47c	1.98de	3.4bcd	1.78abc	2.41a
Victoria	2.14ab	1.72d	2.84	2.08bcd	2.69abc	2.48abc	3.68ab	1.68bcd	1.69bcd
Cuf 101	1.43c	1.83d	2.86	2.02cde	2.64abc	1.88e	3.06cd	1.49cde	1.58cd
Aragón	2.12ab	1.83cd	3.39	1.82def	2.91a	2.08cde	3.52abc	2.18a	2.13abc
San Isidro	1.88bc	1.71d	3.12	1.73ef	2.64abc	1.88e	2.97d	1.33de	1.37d
Media	2.1	1.9	3.22	2.08	2.7	2.26	3.56	1.7	1.97
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía	S ₂								
Genex	2.47a	2.66	3.25a	3.63ab	3.16	2.92ab	3.24abc	3.63a	2.81b
Atlixco	2.08abc	2.66	2.72abc	3.89a	2.92	2.97a	2.61bcd	2.86bc	2.74b
Júpiter	2.22ab	2.34	3.05ab	4.06a	3.2	2.41abc	3.34ab	2.79bcd	3.27a
Oaxaca	2.15abc	2.09	2.43bc	3.1bc	2.75	2.16abcd	2.79abcd	2.1e	2.16d
San Miguel	1.27d	1.91	2.46bc	3.03bc	2.74	1.73bcd	2.29cd	3.29ab	2.72b
Milenia	2.25ab	2.18	3.11ab	3.9a	2.85	3.3a	3.77a	3.09abc	2.48bc
Victoria	1.52bcd	1.85	2.24c	3.06bc	2.82	1.05d	1.24e	2.15de	2.27d
Cuf 101	1.63bcd	2.35	3.14ab	3.92a	3.21	2.18abcd	2.9abcd	2.51cde	2.65bc
Aragón	1.62bcd	2.06	2.65abc	2.58c	2.71	1.46cd	2.67bcd	2.18de	2.66bc
San Isidro	1.42cd	1.58	2.19c	2.93bc	2.57	1.38cd	2.04de	2.51cde	2.34cd
Media	1.86	2.17	2.72	3.41	2.89	2.16	2.69	2.71	2.61

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p < 0.05$).

Cuadro A5. Relación hoja:tallo en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	0.63c	0.62d	0.71bc	0.61d	0.69d	0.58gh	0.65cd	0.59bcde	0.71cd
Atlixco	0.65c	0.62d	0.65d	0.62d	0.69d	0.56h	0.67bc	0.56cde	0.7cd
Júpiter	0.6d	0.67c	0.68cd	0.63d	0.47f	0.61fg	0.66cd	0.55de	0.72cd
Oaxaca	0.66c	0.6de	0.65d	0.63d	0.68de	0.64ef	0.63d	0.59bcde	0.71cd
San Miguel	0.57e	0.65c	0.67d	0.54e	0.65e	0.58gh	0.66cd	0.52e	0.59d
Milenia	0.66c	0.62d	0.74b	0.7b	0.73c	0.68cd	0.7b	0.68ab	0.76c
Victoria	0.65c	0.72b	0.67d	0.67bc	0.94a	0.73b	0.7b	0.65abc	0.79bc
Cuf 101	0.6de	0.59e	0.75b	0.64cd	0.7cd	0.65de	0.67bc	0.64abcd	0.77c
Aragón	0.74b	0.74b	0.73b	0.7b	0.82b	0.71bc	0.7b	0.73a	0.94ab
San Isidro	0.78a	0.78a	1.06a	0.8a	0.92a	0.78a	0.93a	0.69a	1.04a
Media	0.65	0.66	0.73	0.65	0.73	0.65	0.7	0.62	0.77
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	0.7bcd	0.59bcd	0.66cde	0.66c	0.68d	0.62bc	0.7b	0.76bc	0.69bc
Atlixco	0.62cd	0.55cd	0.61e	0.74bc	0.68cd	0.58c	0.58b	0.6c	0.7bc
Júpiter	0.65bcd	0.62bcd	0.71bcd	0.65c	0.71bcd	0.6c	0.63b	0.65c	0.7bc
Oaxaca	0.66bcd	0.58bcd	0.64e	0.74bc	0.6e	0.64abc	0.69b	0.73c	0.58c
San Miguel	0.6d	0.54d	0.62e	0.71bc	0.72bcd	0.6c	0.68b	0.62c	0.57c
Milenia	0.7bcd	0.64bc	0.66de	0.88ab	0.74bc	0.66abc	0.77b	0.81bc	0.72bc
Victoria	0.74b	0.65abc	0.74b	0.88ab	0.75b	0.7ab	0.72b	0.76bc	0.73bc
Cuf 101	0.69bcd	0.62bcd	0.73bc	0.66c	0.72bcd	0.66abc	0.67b	0.81bc	0.63bc
Aragón	0.74bc	0.65ab	0.68bcde	0.97a	0.76b	0.72ab	0.81b	0.94b	0.76b
San Isidro	0.9a	0.74a	0.82a	0.95a	0.83a	0.75a	1.24a	1.4a	1.1a
Media	0.7	0.62	0.69	0.78	0.72	0.65	0.75	0.81	0.72

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A6. Relación hoja:tallo en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía	S ₁								
Genex	0.57f	0.56f	0.67f	0.69b	0.63e	0.6d	0.64c	0.74e	0.84de
Atlixco	0.64e	0.62e	0.68f	0.6d	0.57f	0.6d	0.65c	0.65f	0.81e
Júpiter	0.6f	0.65de	0.64g	0.62c	0.64e	0.55e	0.69b	0.75de	0.86cd
Oaxaca	0.58f	0.65cd	0.71e	0.63c	0.66e	0.55e	0.64c	0.58g	0.74f
San Miguel	0.65de	0.65cd	0.66fg	0.57e	0.65e	0.6d	0.63c	0.88b	0.89c
Milenia	0.71bc	0.7ab	0.72de	0.69b	0.76d	0.68b	0.77a	0.82c	0.88c
Victoria	0.72b	0.68abc	0.76c	0.72a	0.84b	0.67b	0.71b	0.79cd	0.97b
Cuf 101	0.68cd	0.67bcd	0.75cd	0.69b	0.74d	0.63c	0.79a	0.88b	0.72f
Aragón	0.68cd	0.7a	0.81b	0.69b	0.79c	0.67b	0.69b	1.19a	0.87cd
San Isidro	0.75a	0.7a	1a	0.69b	1.06a	0.96a	0.78a	0.8c	1.02a
Media	0.66	0.66	0.74	0.66	0.73	0.65	0.7	0.81	0.86
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía	S ₂								
Genex	0.72cde	0.62cd	0.67cd	0.62f	0.71bc	0.77c	0.76bc	0.84cd	0.7bcd
Atlixco	0.66e	0.63bcd	0.56e	0.76de	0.59d	0.77c	0.64c	0.71f	0.66cd
Júpiter	0.71de	0.55e	0.67bcd	0.79cde	0.75abc	0.66d	0.83ab	0.69f	0.75abc
Oaxaca	0.73cde	0.62bcd	0.65d	0.71e	0.71bc	0.64d	0.75bc	0.61g	0.62d
San Miguel	0.67de	0.64bcd	0.66cd	0.82bcd	0.75abc	0.85bc	0.72bc	0.9bc	0.73abc
Milenia	0.79bc	0.6de	0.69bcd	0.76de	0.67cd	0.87b	0.84ab	0.76ef	0.62d
Victoria	0.81b	0.66bc	0.74b	0.96a	0.75abc	0.84bc	0.68c	0.79de	0.67cd
Cuf 101	0.75bcd	0.68b	0.72bc	0.8cde	0.77ab	0.67d	0.83ab	0.79de	0.78ab
Aragón	0.81b	0.67bc	0.71bcd	0.86bc	0.75abc	0.88ab	0.93a	0.93ab	0.81a
San Isidro	1a	0.9a	0.88a	0.91ab	0.82a	0.96a	0.85ab	0.98a	0.8a
Media	0.76	0.66	0.7	0.8	0.73	0.79	0.78	0.8	0.71

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A7. Altura de planta (cm) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	83a	71b	74a	76ab	75cd	71a	63bcd	86abc	82a
Atlixco	81ab	71b	74a	78ab	83bc	76a	63bcd	86abcd	83a
Júpiter	87a	69bc	72ab	83a	82c	76a	68ab	98a	84a
Oaxaca	81ab	62d	72ab	76b	94a	73a	67abc	89ab	80a
San Miguel	86a	70b	63c	74b	92ab	73a	60cd	83abcd	76ab
Milena	87a	79a	77a	83a	80c	76a	72a	86abc	86a
Victoria	75b	65cd	71ab	66c	69d	47c	49e	71cd	65bc
Cuf 101	83a	72b	71ab	78ab	83bc	69a	61bcd	70d	78ab
Aragón	64c	68bc	66bc	74b	76cd	59b	57d	81bcd	77ab
San Isidro	61c	69bc	49d	60c	56e	54b	46e	71d	61c
Media	79	69	69	75	79	67	61	82	77
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	79b	73b	70abc	71abc	76bc	102abcd	78abcd	78a	79ab
Atlixco	79b	76ab	77a	71abc	85a	115a	84ab	83a	77abc
Júpiter	80ab	73b	69abc	79a	72cd	103abc	77bcd	81a	74abc
Oaxaca	77b	71bc	76ab	79a	73c	109ab	85a	71abc	80a
San Miguel	77b	73b	66bc	69bc	72cd	93bcd	71de	70abc	71c
Milena	87a	78ab	75ab	76ab	81ab	112ab	81abc	75ab	74abc
Victoria	73bc	82a	59c	51d	59e	84d	62f	61bc	71c
Cuf 101	77b	72b	69abc	68bc	71cd	87cd	74cde	70abc	72bc
Aragón	76bc	73b	66abc	62c	66de	94bcd	69ef	60bc	63d
San Isidro	69c	63c	63c	65c	66de	87cd	54g	55c	60d
Media	77	73	69	69	72	99	74	70	72

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A8. Altura de planta (cm) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía	S ₁								
Genex	83abc	73a	70abc	76bc	79b	73bc	63bc	53abc	65cd
Atlixco	77cd	70ab	72ab	74cd	96a	70cde	63bc	57a	71bc
Júpiter	85ab	73a	73ab	81ab	81b	82a	63bc	43de	73abc
Oaxaca	89a	62d	75a	85a	79b	76ab	65b	41bcde	81ab
San Miguel	74def	66bcd	67bcd	73cd	79b	62f	57d	46abcd	65cd
Milenia	79bcd	73a	70abc	74cd	80b	72bcd	78a	53abc	88a
Victoria	74def	69ab	67bcd	69de	78b	66ef	60cd	54ab	53d
Cuf 101	71ef	67bcd	64cd	73cd	70c	66def	61c	38e	63cd
Aragón	75de	67bc	62d	71cd	77bc	64f	60cd	49abcd	63cd
San Isidro	68f	63cd	54e	63e	53d	52g	48e	42cde	63cd
Media	78	68	67	74	77	68	62	48	68
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía	S ₂								
Genex	76bc	72abcd	69bcd	80a	71bc	50a	65bc	68a	65b
Atlixco	74bcd	77a	79a	70bc	83a	45bc	69b	60abc	66ab
Júpiter	78abc	76ab	69bcd	76ab	75ab	48ab	80a	65ab	73a
Oaxaca	84a	74ab	74abc	75abc	71bc	44bc	67bc	57bcd	74a
San Miguel	72cde	69bcd	67cde	66c	69bc	42c	62bc	57bcd	56c
Milenia	81ab	77a	75ab	74abc	78ab	48ab	70b	66ab	65b
Victoria	66ef	66d	60e	55d	64cd	36c	50d	48d	68ab
Cuf 101	73cd	73abc	66de	67bc	71bc	42c	61bc	51cd	65b
Aragón	65f	66d	63de	53d	64cd	42c	61bc	50d	64b
San Isidro	68def	67cd	60e	54d	57d	44bc	59cd	51cd	62bc
Media	74	71	68	67	70	44	64	57	66

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A9. Número de tallos en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	13a	10cde	21a	19abc	24a	22a	19a	35	25bc
Atlixco	11ab	11abc	19ab	21ab	25a	18b	18a	36	24bc
Júpiter	13a	10bcde	20ab	17cd	24a	18b	19a	28	24bc
Oaxaca	11ab	11abcd	19ab	18bcd	24a	17bc	19a	32	28b
San Miguel	13ab	11ab	20a	22a	22ab	18b	18a	33	35a
Milenia	7d	10cde	16c	15de	20bc	13d	14bc	31	23bc
Victoria	11abc	9de	18bc	15de	18cd	17bc	18a	26	21cd
Cuf 101	10bcd	10cde	19ab	16cd	19bcd	16bc	17ab	27	16d
Aragón	8cd	9e	19ab	12e	19bc	15cd	15bc	30	22c
San Isidro	11abc	12a	14d	16cd	16d	16bc	17ab	32	16d
Media	11	10	18	17	21	17	17	31	23
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	25ab	16bc	20a	250	23a	40a	34a	23bc	23a
Atlixco	22bcd	21a	19a	200	23a	38a	31ab	19bcd	23a
Júpiter	23bc	16bc	20a	160	21ab	36a	29abc	24b	20ab
Oaxaca	25ab	18ab	19a	200	21ab	36a	28abc	29a	20ab
San Miguel	30a	19ab	21a	190	20abc	37a	26bc	22bc	20ab
Milenia	17d	11d	13b	180	16c	34a	25bc	17d	18bc
Victoria	21bcd	14bcd	18a	180	21ab	35a	25bc	18cd	15c
Cuf 101	21bcd	15bcd	18a	190	21ab	25b	23c	18cd	17bc
Aragón	18cd	12cd	18a	150	18bc	27b	22c	19bcd	16c
San Isidro	21bcd	15bcd	12b	150	11d	36a	24c	15d	16c
Media	22	16	18	18	20	34	27	20	19

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A10. Número de tallos en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía	S ₁								
Genex	12ab	11a	19bc	19ab	24b	19ab	18ab	17ab	19abc
Atlixco	11bcde	10ab	22a	21a	29a	20a	19a	21a	21a
Júpiter	13a	10abc	18bcd	18b	24b	17bc	19a	17bcd	19ab
Oaxaca	11bcd	10abc	21ab	19ab	22b	16c	18b	16ab	17bcd
San Miguel	11bc	9bc	19abc	17bc	24b	19ab	20a	16ab	19abc
Milenia	10bcde	10bc	20ab	14d	15e	13d	18b	14bcd	18abc
Victoria	9cde	9bc	16d	17bc	21bc	16cd	17bc	15abc	16cde
Cuf 101	9e	10c	16d	15cd	19cd	16c	15d	10cd	15de
Aragón	9de	9c	18bcd	14d	18de	15cd	15cd	15abc	13e
San Isidro	9cde	9c	16cd	14d	16de	13d	13e	9d	14de
Media	10	10	18	17	21	16	17	15	17
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía	S ₂								
Genex	18ab	13bc	18a	17abc	17bc	18b	19bc	21a	13b
Atlixco	18a	17a	16abc	21a	19ab	26a	24a	17b	17a
Júpiter	14c	13bc	18ab	17ab	23a	17b	14d	15bc	17a
Oaxaca	17ab	12bc	16abc	15bc	16bc	16b	21a	21a	12bc
San Miguel	17ab	15ab	15abcd	15bc	17bc	16bc	19bc	14bcd	16a
Milenia	17ab	11c	13cde	14bcd	16bc	12bcd	18bcd	12cde	11c
Victoria	17ab	11c	12cde	13bcd	16bc	17b	15cd	8f	12bc
Cuf 101	14c	12c	12de	13cd	15bc	16bc	14d	12def	12bc
Aragón	14c	11c	11e	13cd	14c	10cd	18bcd	11ef	11c
San Isidro	16b	11c	14bcde	10d	10d	8d	16cd	9f	10c
Media	16	13	14	15	16	16	18	14	13

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A11. Eficiencia en el uso de la radiación (g de MS MJ⁻¹) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Riego	R ₁								
Genex	0.62a	0.64a	0.97a	0.66ab	0.84a	0.89a	1.16a	0.66abc	1.52a
Atlixco	0.54ab	0.6a	0.8b	0.64abc	0.8ab	0.76ab	1.13a	0.66ab	1.36ab
Júpiter	0.62a	0.59a	0.83b	0.71a	0.79abc	0.7bc	1.11ab	0.71a	1.31ab
Oaxaca	0.59ab	0.6a	0.84b	0.61bcd	0.84a	0.76ab	1.03abc	0.62abcd	1.25bcd
San Miguel	0.55ab	0.59a	0.81b	0.63abc	0.77abcd	0.76ab	0.95bc	0.65abc	1.04de
Milenia	0.51bc	0.59a	0.75bc	0.56cd	0.7abcd	0.63bcd	1.08ab	0.61bcde	1.25bcd
Victoria	0.48bc	0.57ab	0.77b	0.61bcd	0.62cd	0.61bcd	0.95bc	0.52f	1.04de
Cuf 101	0.53ab	0.51bc	0.79b	0.54d	0.72abcd	0.64bcd	1abc	0.57cdef	1.3abc
Aragón	0.3d	0.44c	0.66c	0.37e	0.64bcd	0.54cd	0.89c	0.54def	1.05cde
San Isidro	0.42c	0.5bc	0.55d	0.43e	0.6d	0.48d	0.66d	0.53ef	0.93e
Media	0.51	0.56	0.78	0.58	0.73	0.68	0.99	0.61	1.2
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Riego	R ₂								
Genex	0.77ab	1.17a	1.17ab	1.22a	1.11ab	1.14a	0.84ab	1.1a	1.15a
Atlixco	0.83a	1.17a	1.21a	1.06abcd	1.14a	0.89abc	0.94a	0.97abc	1.07abcd
Júpiter	0.74ab	1.13a	1.07abcd	1.18a	1.06abcd	1.07ab	0.81ab	1abc	1.13ab
Oaxaca	0.69bc	1.1ab	1.05abcd	1.15abc	1.08abc	0.9abc	0.79ab	1.08ab	0.94bcd
San Miguel	0.72abc	1.08ab	1.14abc	1.16ab	1.05abcd	0.95abc	0.72b	0.83cde	1.09abc
Milenia	0.82a	1.24a	1.1abcd	1.04abcd	1.11ab	0.96abc	0.79ab	0.95abcd	0.97abcd
Victoria	0.64c	0.95bc	0.96cde	0.89d	0.93d	0.85abcd	0.54c	0.75de	1.04abcd
Cuf 101	0.67bc	0.84c	1.02bcde	1.02abcd	0.95cd	0.79bcd	0.79ab	0.89bcd	0.9cd
Aragón	0.65c	1.07ab	0.93de	0.96bcd	0.99bcd	0.53d	0.39c	0.67e	0.87d
San Isidro	0.64c	0.88c	0.89e	0.93cd	0.99bcd	0.69cd	0.39c	0.46f	0.6e
Media	0.72	1.06	1.05	1.06	1.04	0.88	0.7	0.87	0.98

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro A12. Eficiencia en el uso de la radiación (g de MS MJ⁻¹) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante								
	112	140	175	210	245	280	315	406	434
Sequía S ₁									
Genex	0.64ab	0.74a	0.85ab	0.65a	0.79bc	0.77a	1.10a	0.18a	0.52a
Atlixco	0.53abc	0.64b	0.83ab	0.65a	0.91a	0.76a	1.11a	0.17a	0.55a
Júpiter	0.64a	0.6bc	0.85ab	0.67a	0.77bcd	0.72a	1.09ab	0.17a	0.51ab
Oaxaca	0.5cd	0.38g	0.81ab	0.71a	0.83b	0.74a	1.07ab	0.14bc	0.35cd
San Miguel	0.53bc	0.56cde	0.86a	0.68a	0.76bcd	0.80a	1.01abc	0.16ab	0.51ab
Milenia	0.47cd	0.57cd	0.75bc	0.46d	0.66ef	0.55cd	0.87cd	0.16ab	0.55 ^a
Victoria	0.49cd	0.48f	0.66cd	0.56b	0.68e	0.7ab	0.99abc	0.16abc	0.36bcd
Cuf 101	0.33e	0.52def	0.67cd	0.55bc	0.72de	0.55cd	0.77d	0.13bc	0.4abcd
Aragón	0.5cd	0.5ef	0.76abc	0.5bcd	0.75cd	0.59bc	0.96bc	0.16ab	0.48abc
San Isidro	0.42de	0.47f	0.63d	0.48cd	0.59f	0.44d	0.75d	0.12c	0.29d
Media	0.50	0.55	0.77	0.59	0.74	0.66	0.97	0.16	0.45
	462	490	518	553	588	686	742	770	798
Sequía S ₂									
Genex	0.56a	0.79a	0.8a	1.07a	0.86ab	0.27a	0.43a	0.74a	0.72ab
Atlixco	0.5abc	0.78ab	0.75ab	1.01ab	0.89a	0.26a	0.38ab	0.65abc	0.73ab
Júpiter	0.51ab	0.75ab	0.75ab	1.02a	0.85ab	0.24a	0.42ab	0.64abc	0.8a
Oaxaca	0.49abc	0.63abc	0.62abc	0.86bc	0.76abc	0.22ab	0.37ab	0.54cd	0.6cd
San Miguel	0.3d	0.55bcd	0.61bc	0.75cd	0.75bc	0.16bc	0.31bc	0.63bc	0.66bc
Milenia	0.49abc	0.66abc	0.75ab	1.01ab	0.81ab	0.28a	0.48a	0.67ab	0.69bc
Victoria	0.32d	0.53cd	0.53c	0.7cd	0.75bc	0.17bc	0.24c	0.45de	0.6cd
Cuf 101	0.37bcd	0.66abc	0.74ab	0.99ab	0.84ab	0.21ab	0.37ab	0.53cd	0.65bcd
Aragón	0.35cd	0.59abcd	0.64abc	0.63cd	0.74bc	0.13c	0.32bc	0.42e	0.59cd
San Isidro	0.27d	0.38d	0.46c	0.69d	0.65c	0.11c	0.25c	0.47de	0.55d
Media	0.42	0.63	0.67	0.87	0.79	0.21	0.36	0.57	0.66

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

ANEXO B

Cuadro B1. Potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P) en riego R_1 y sequía S_1 en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	346 ddt			361 ddt			378 ddt			392 ddt			407 ddt			Media		
	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P
R_1																		
Genex	-0.52	-1.6	1.08	-0.52	-1.44	0.92	-0.49	-1.48	0.98	-0.57	-1.52	0.95	-0.54	-1.5	0.96	-0.53	-1.51	0.98
Milena	-0.57	-1.64	1.08	-0.52	-1.49	0.97	-0.5	-1.51	1.01	-0.56	-1.44	0.88	-0.53	-1.47	0.95	-0.54	-1.51	0.98
Atlixco	-0.56	-1.58	1.02	-0.57	-1.5	0.93	-0.53	-1.54	1.01	-0.57	-1.55	0.97	-0.55	-1.52	0.97	-0.56	-1.54	0.98
Júpiter	-0.57	-1.56	0.99	-0.59	-1.53	0.93	-0.54	-1.62	1.08	-0.58	-1.64	1.06	-0.57	-1.64	1.07	-0.57	-1.6	1.03
Cuf 101	-0.61	-1.62	1.01	-0.6	-1.57	0.97	-0.57	-1.69	1.12	-0.57	-1.57	1.00	-0.56	-1.6	1.03	-0.58	-1.61	1.03
Oaxaca	-0.61	-1.62	1	-0.6	-1.56	0.96	-0.53	-1.57	1.04	-0.57	-1.64	1.07	-0.57	-1.67	1.1	-0.58	-1.61	1.03
San Isidro	-0.61	-1.62	1.02	-0.62	-1.71	1.09	-0.56	-1.72	1.16	-0.6	-1.69	1.1	-0.59	-1.87	1.28	-0.6	-1.72	1.13
Victoria	-0.61	-1.58	0.97	-0.61	-1.68	1.07	-0.58	-1.78	1.2	-0.64	-1.81	1.16	-0.58	-1.83	1.26	-0.6	-1.74	1.13
San Miguel	-0.61	-1.61	1	-0.63	-1.71	1.09	-0.57	-1.74	1.17	-0.65	-1.86	1.21	-0.58	-1.77	1.19	-0.61	-1.74	1.13
Aragón	-0.59	-1.64	1.06	-0.64	-1.76	1.12	-0.59	-1.83	1.24	-0.63	-1.77	1.14	-0.62	-1.89	1.27	-0.61	-1.78	1.17
Media	-0.58	-1.61	1.02	-0.59	-1.6	1.00	-0.55	-1.65	1.10	-0.6	-1.65	1.05	-0.57	-1.68	1.11	-0.58	-1.64	1.06
S_1																		
Genex	-0.58	-1.59	1.01	-0.95a	-1.79a	0.85a	-1.63a	-2.37a	0.73a	-2.36ab	-2.88ab	0.51a	-2.94ab	-3.34ab	0.4b	-1.69	-2.39	0.7
Milena	-0.56	-1.59	1.03	-1.02a	-1.84a	0.82ab	-1.68a	-2.39ab	0.71a	-2.32a	-2.80a	0.48b	-2.88a	-3.32a	0.44a	-1.69	-2.39	0.7
Atlixco	-0.56	-1.68	1.12	-1.02a	-1.84a	0.83ab	-1.83b	-2.42abc	0.58cd	-2.45ab	-2.90abc	0.45bc	-3.07ab	-3.35ab	0.28d	-1.78	-2.44	0.65
Júpiter	-0.52	-1.61	1.09	-1.11b	-1.86ab	0.76cd	-1.85b	-2.49abcde	0.64b	-2.51bcd	-2.96abcd	0.45bc	-3.1bc	-3.42abcd	0.33c	-1.82	-2.47	0.65
Cuf 101	-0.56	-1.58	1.02	-1.17bc	-1.87ab	0.7ef	-1.88cb	-2.54bcdef	0.66b	-2.46abc	-2.91abc	0.46bc	-3.09abc	-3.41abc	0.33c	-1.83	-2.46	0.63
Oaxaca	-0.59	-1.62	1.04	-1.13b	-1.86ab	0.73cde	-1.85b	-2.44abcd	0.59c	-2.5bc	-2.96abcd	0.46bc	-3.12bcd	-3.45abcde	0.33c	-1.84	-2.47	0.63
San Isidro	-0.58	-1.67	1.09	-1.22cd	-2.00c	0.78bc	-1.98cd	-2.55cdef	0.57cd	-2.52bcd	-3.00bcd	0.48b	-3.32de	-3.63de	0.31c	-1.92	-2.57	0.65
Victoria	-0.56	-1.61	1.05	-1.2c	-1.97bc	0.77c	-2.07d	-2.61ef	0.54d	-2.66de	-3.11d	0.44c	-3.28cde	-3.6cde	0.32c	-1.95	-2.58	0.62
San Miguel	-0.61	-1.61	0.99	-1.28d	-2.01c	0.73de	-2.03d	-2.57def	0.55cd	-2.69e	-3.14d	0.45bc	-3.28cde	-3.55bcde	0.26d	-1.98	-2.57	0.6
Aragón	-0.55	-1.61	1.06	-1.36e	-2.04c	0.68f	-2.08d	-2.65f	0.56cd	-2.61cde	-3.07cd	0.46bc	-3.38e	-3.65e	0.27d	-2.00	-2.6	0.61
Media	-0.57	-1.62	1.05	-1.15	-1.91	0.76	-1.89	-2.50	0.61	-2.51	-2.97	0.47	-3.15	-3.47	0.33	-1.85	-2.49	0.64

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p < 0.05$).

Cuadro B2. Potencial hídrico (Ψ), osmótico (π) y de turgencia (P) en riego R₂ y sequía S₂ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	619 ddt			634 ddt			657 ddt			672 ddt			687 ddt			Media		
	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P	Ψ	π	P
R ₂																		
Genex	-0.57	-1.58	1.01	-0.53	-1.5	0.97	-0.52	-1.47	0.95	-0.56	-1.44	0.88	-0.53	-1.44	0.92	-0.54	-1.49	0.95
Milenia	-0.48	-1.64	1.16	-0.54	-1.5	0.97	-0.49	-1.44	0.95	-0.56	-1.55	0.99	-0.53	-1.47	0.94	-0.52	-1.52	1
Atlixco	-0.57	-1.61	1.04	-0.51	-1.45	0.94	-0.54	-1.5	0.97	-0.56	-1.53	0.97	-0.55	-1.49	0.94	-0.54	-1.52	0.97
Júpiter	-0.55	-1.68	1.13	-0.57	-1.58	1.01	-0.55	-1.59	1.04	-0.58	-1.57	0.98	-0.55	-1.56	1.01	-0.56	-1.6	1.03
Cuf 101	-0.61	-1.66	1.05	-0.56	-1.57	1.01	-0.55	-1.53	0.98	-0.6	-1.64	1.03	-0.56	-1.63	1.07	-0.58	-1.61	1.03
Oaxaca	-0.6	-1.6	1.01	-0.55	-1.54	0.99	-0.56	-1.65	1.09	-0.59	-1.63	1.04	-0.56	-1.6	1.04	-0.57	-1.6	1.03
San Isidro	-0.59	-1.57	0.99	-0.58	-1.69	1.11	-0.62	-1.79	1.17	-0.6	-1.69	1.08	-0.58	-1.79	1.21	-0.59	-1.71	1.11
Victoria	-0.54	-1.62	1.08	-0.63	-1.78	1.15	-0.56	-1.68	1.12	-0.61	-1.76	1.15	-0.57	-1.73	1.16	-0.58	-1.71	1.13
San Miguel	-0.6	-1.56	0.96	-0.58	-1.72	1.14	-0.56	-1.7	1.14	-0.61	-1.8	1.18	-0.63	-1.85	1.22	-0.6	-1.73	1.13
Aragón	-0.57	-1.64	1.07	-0.6	-1.73	1.13	-0.58	-1.74	1.17	-0.63	-1.85	1.22	-0.6	-1.83	1.23	-0.6	-1.76	1.16
Media	-0.57	-1.62	1.05	-0.56	-1.61	1.04	-0.55	-1.61	1.06	-0.59	-1.65	1.05	-0.57	-1.64	1.07	-0.57	-1.62	1.06
S ₂																		
Genex	-0.57	-1.63	1.06	-1.02b	-1.91a	0.89a	-2.01a	-2.63ab	0.62a	-2.77a	-3.14a	0.37b	-3.2a	-3.58a	0.38a	-1.91	-2.58	0.66
Milenia	-0.57	-1.64	1.06	-1.02b	-1.91a	0.9a	-1.96a	-2.61a	0.64a	-2.9abc	-3.24ab	0.34c	-3.26ab	-3.6a	0.34b	-1.94	-2.6	0.66
Atlixco	-0.62	-1.6	0.98	-0.92a	-1.86a	0.94a	-2.16b	-2.66abc	0.49cd	-2.81ab	-3.22ab	0.4a	-3.39abc	-3.61a	0.22de	-1.98	-2.59	0.61
Júpiter	-0.61	-1.66	1.05	-1.26de	-1.94ab	0.68cd	-2.18bc	-2.73abcde	0.55b	-2.91abc	-3.25abc	0.35c	-3.41abc	-3.67ab	0.27c	-2.07	-2.65	0.58
Cuf 101	-0.53	-1.6	1.07	-1.21cd	-1.93ab	0.72bc	-2.18bc	-2.68abcd	0.5c	-2.96abcd	-3.3abcd	0.34c	-3.44bcd	-3.71abcd	0.27c	-2.06	-2.64	0.58
Oaxaca	-0.63	-1.64	1.01	-1.17c	-1.93ab	0.76b	-2.21bc	-2.78abcde	0.57b	-2.95abcd	-3.3abcd	0.35cb	-3.42abc	-3.68abc	0.27c	-2.08	-2.67	0.59
San Isidro	-0.52	-1.68	1.16	-1.3e	-2.04bc	0.74b	-2.41d	-2.89e	0.47cde	-2.97bcde	-3.34bcde	0.37b	-3.6cde	-3.86cde	0.26c	-2.16	-2.76	0.6
Victoria	-0.54	-1.61	1.08	-1.45f	-2.11c	0.66d	-2.31cd	-2.79bcde	0.48cde	-3.06cde	-3.41cde	0.35cb	-3.6cde	-3.81bcde	0.2e	-2.19	-2.75	0.55
San Miguel	-0.53	-1.69	1.16	-1.41f	-2.07c	0.66d	-2.36d	-2.81cde	0.46de	-3.11de	-3.45de	0.33c	-3.7e	-3.91e	0.21e	-2.22	-2.79	0.56
Aragón	-0.61	-1.61	1	-1.41f	-2.08c	0.66d	-2.4d	-2.85de	0.45e	-3.14e	-3.48e	0.34c	-3.64de	-3.89de	0.25cd	-2.24	-2.78	0.54
Media	-0.57	-1.63	1.06	-1.22	-1.98	0.76	-2.22	-2.74	0.52	-2.96	-3.31	0.36	-3.47	-3.73	0.27	-2.09	-2.68	0.59

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro B3. Ajuste osmótico en riego-sequía en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante (ddt)			
	361	378	392	407
R ₁ S ₁				
Genex	0.35a	0.89a	1.36a	1.84ab
Milenia	0.35ab	0.88a	1.36a	1.85a
Atlixco	0.34ab	0.87ab	1.35ab	1.84abc
Júpiter	0.34b	0.87ab	1.32bcd	1.78bcd
Cuf 101	0.3cd	0.85bc	1.34abc	1.82abcd
Oaxaca	0.3c	0.87ab	1.32bcd	1.78cd
San Isidro	0.29cd	0.83cd	1.31cd	1.76d
Victoria	0.3cd	0.83cd	1.3d	1.77d
San Miguel	0.29de	0.83cd	1.28d	1.77d
Aragón	0.28e	0.82d	1.3cd	1.76d
Media	0.31	0.85	1.32	1.8
	634	657	672	687
R ₂ S ₂				
Genex	0.41a	1.16ab	1.7a	2.14a
Milenia	0.41a	1.17a	1.69ab	2.13a
Atlixco	0.41a	1.15ab	1.69ab	2.13ab
Júpiter	0.36bc	1.14abc	1.69ab	2.11abc
Cuf 101	0.36b	1.15ab	1.66bc	2.08cd
Oaxaca	0.4a	1.13bcd	1.66bc	2.09bcd
San Isidro	0.35bc	1.1d	1.65c	2.07d
Victoria	0.33d	1.12cd	1.65c	2.08cd
San Miguel	0.35bc	1.11cd	1.65c	2.06d
Aragón	0.35c	1.1d	1.63c	2.06d
Media	0.37	1.13	1.67	2.09

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p < 0.05$).

Cuadro B4. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (gi), tasa de transpiración (E) y eficiencia en el uso de agua (EUA) en riego R₁ y sequía S₁ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	346 ddt				361 ddt				378 ddt				392 ddt				407 ddt			
	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA
R ₁																				
Genex	14.7	13	3.5	4.3	14.9	13.1	3.5	4.3	14.6	13.1	3.5	4.2	17.4	17.1	4.4	4	16.7	15.5	4.1	4.1
Júpiter	16.7	16.7	4.2	4	15.1	14.1	3.7	4.1	15.1	14	3.7	4.2	16.7	16.8	4.3	4	16.8	16.8	4.3	4
Aragón	16.5	15.4	4	4.1	14.4	12.6	3.4	4.3	16.2	15.1	3.9	4.1	15.5	14.6	3.8	4.1	17.6	17.4	4.4	4
Victoria	15.8	13.7	3.7	4.3	14.3	12.5	3.3	4.3	14.9	12.9	3.5	4.3	16.1	15.2	3.9	4.1	16.9	16.3	4.2	4
Milenia	15	13.3	3.5	4.3	14.4	12.7	3.4	4.4	15.5	14.4	3.8	4.2	14.5	13.5	3.5	4.2	15.3	14.1	3.7	4.2
San Isidro	14.8	12.6	3.4	4.4	14.5	12.2	3.3	4.4	13.8	12	3.2	4.3	16.5	16.1	4.1	4	14.9	12.8	3.5	4.3
Cuf 101	15.5	14.3	3.7	4.2	13	11.2	3	4.3	14.8	13.5	3.5	4.2	15.9	15.2	3.9	4.1	15.9	15.1	3.9	4.1
Atlixco	14.7	13.9	3.6	4.1	12.6	11.2	3	4.4	14.4	13	3.4	4.3	15.1	14.6	3.7	4.1	16.2	15.4	4	4.1
Oaxaca	14	12.4	3.3	4.3	12.1	10	2.8	4.5	15.1	13.6	3.6	4.2	15.8	14.5	3.8	4.2	15.1	13.3	3.6	4.3
San Miguel	14	11.3	3.1	4.5	12.3	9.6	2.7	4.6	13.5	11.1	3.1	4.5	13.8	11.3	3.1	4.4	14.6	12.6	3.4	4.3
Media	15.2	13.6	3.6	4.2	13.8	11.9	3.2	4.4	14.8	13.3	3.5	4.3	15.7	14.9	3.9	4.1	16	14.9	3.9	4.1
S ₁																				
Genex	16.9	15.5	4.1	4.2	8.8abc	6.3a	1.8ab	4.8e	5.7a	3.3ab	1.1a	5.3c	4.9ab	2.6ab	0.9b	5.6cd	3.9a	1.9a	0.6a	6.4c
Júpiter	15.1	12.2	3.4	4.5	9ab	6.4ab	1.9ab	4.8de	5.5abc	3.1a	1ab	5.4c	4.9ab	2.5bc	0.9b	5.7bc	3bc	0.9b	0.4abc	7.6c
Aragón	16.2	14.4	3.8	4.3	8bcd	5.5bc	1.7bc	4.9bcde	4.3e	2c	0.7d	6a	3.7cd	1.7c	0.6cd	6.2ab	3b	0.9b	0.4ab	7.4c
Victoria	15.5	13.3	3.6	4.3	8.3bcd	5.6bc	1.7bc	4.9cde	5.1abc	2.7ab	0.9abc	5.5bc	4.2bcd	1.9c	0.7bcd	6abc	2.9bc	0.9b	0.3bc	10.8a
Milenia	14	11.6	3.2	4.4	9.4a	6.7a	2a	4.7e	5.6ab	3.3a	1.1a	5.3c	5.5a	3.3a	1.1a	5.1d	3.3ab	1.3b	0.5ab	7.4c
San Isidro	14.7	12.4	3.4	4.4	7.7cd	5.2c	1.6c	4.9bcd	4.9abcde	2.7abc	0.9abcd	5.6abc	4.6abc	2.3c	0.8bc	5.8abc	2.6bc	0.5b	0.3bc	9abc
Cuf 101	14.6	12.9	3.4	4.30	7.7d	5c	1.5cd	5ab	4.6de	2.4bc	0.8cd	5.7abc	3.5d	1.4d	0.6d	6.3a	3ab	1.2b	0.4ab	7.7bc
Atlixco	15.1	13.9	3.6	4.20	7.5ed	5c	1.5cd	4.9bc	4.9cde	2.5bc	0.9bcd	5.7abc	4.6abc	2.3c	0.8bc	5.8abc	3.4ab	1.2b	0.5ab	6.9c
Oaxaca	16.9	15.3	4	4.20	6.6e	4.1d	1.3d	5.1a	4.9bcde	2.6ab	0.9bcd	5.6abc	4.2bcd	2c	0.7bcd	5.9abc	2.1c	0.4c	0.2c	12.1a
San Miguel	13.9	11	3.1	4.50	8.2bcd	5.6ab	1.7bc	4.9cde	4.5de	2.3c	0.8cd	5.8ab	4.1bcd	1.9c	0.7bcd	6.1abc	3.2ab	1b	0.4ab	7.4c
Media	15.3	13.3	3.6	4.30	8.10	5.60	1.70	4.90	50	2.70	0.90	5.60	4.40	2.20	0.80	5.80	30	10	0.40	8.30

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p < 0.05$). Valores de gi (1×10^{-2}) y EUA (1×10^{-3}).

Cuadro B5. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (gi), tasa de transpiración (E) y eficiencia en el uso de agua (EUA) en riego R₂ y sequía S₂ en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	619 ddt				634 ddt				657 ddt				672 ddt				687 ddt			
	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA	A	gi	E	EUA
R ₂																				
Genex	14.7	12.6	3.4	4.4	15	13.5	3.5	4.3	16	14.9	3.8	4.2	15.3	15.5	3.8	4.1	16.2	16.8	4.1	4
Júpiter	11.6	9.2	2.5	4.6	12.9	10.6	2.9	4.5	14.6	12.8	3.4	4.4	14.8	13.2	3.4	4.3	17	16.8	4.2	4.1
Aragón	11.7	9.4	2.6	4.6	13.6	11.1	3	4.6	15.4	14	3.6	4.4	13.8	11.8	3.1	4.5	14.8	13.9	3.5	4.2
Victoria	11.5	9.4	2.6	4.6	14.5	13	3.4	4.4	14.6	13	3.4	4.4	14.1	13.5	3.4	4.3	16.1	16.1	4	4.1
Milena	13.5	11.1	3	4.5	14.2	12.3	3.2	4.4	15.4	14.8	3.7	4.2	15.7	14.4	3.7	4.3	16.1	15.4	3.9	4.1
San Isidro	12.3	9.4	2.7	4.7	13.3	10.7	2.9	4.6	15.4	13.5	3.5	4.4	14.6	11.7	3.2	4.6	15.8	14.4	3.7	4.3
Cuf 101	12.9	10.4	2.8	4.6	12.9	10.2	2.8	4.6	14.3	11.9	3.2	4.5	15.8	13.9	3.6	4.3	15.7	14.8	3.8	4.2
Atlixco	11.2	9	2.5	4.6	13.7	11.8	3.1	4.4	14.2	12.8	3.3	4.3	15.3	14.3	3.7	4.3	14.7	13.8	3.5	4.2
Oaxaca	12	9.2	2.6	4.7	12.1	9.3	2.6	4.7	13.7	11.3	3.1	4.5	14.2	11.2	3.1	4.6	15.9	15.4	3.9	4.1
San Miguel	10.7	8.1	2.3	4.7	11.7	9	2.5	4.6	13.5	10.4	2.9	4.7	12.7	9.9	2.8	4.6	12.9	10	2.8	4.6
Media	12.2	9.8	2.7	4.6	13.4	11.1	3	4.5	14.7	12.9	3.4	4.4	14.6	12.9	3.4	4.4	15.5	14.7	3.7	4.2
S ₂																				
Genex	12.8	10.1	2.8	4.7	7.5ab	5.5ab	1.6ab	4.70	4.9abc	2.8bc	0.9ab	5.2bc	4.1a	1.8a	0.7a	5.8d	2.8ab	0.7ab	0.3ab	9.5e
Júpiter	13.7	11.3	3.1	4.5	8.1bc	6bc	1.7bc	4.60	4.8ab	2.8ab	0.9ab	5.1bc	4.7ab	2.6cd	0.9abc	5.3bcd	2.8abc	1.2bc	0.5cd	6.4bc
Aragón	12.8	9.8	2.8	4.7	8.8cd	6.6cd	1.9cd	4.60	5.4cd	3.6bc	1.1de	4.9b	4.6bc	2.6cd	0.9cd	5.2ab	3.4bc	1.6bc	0.5cd	7ab
Victoria	12.7	10.8	2.9	4.5	7.9abc	5.9bc	1.7abc	4.60	4.8bcd	2.7c	0.9cde	5.2b	4.3bc	2.1cd	0.8bcd	5.5abc	3.4bc	1.6bc	0.5cd	6.7c
Milena	12.2	9.9	2.7	4.6	6.8a	5a	1.5a	4.70	3.9a	1.9a	0.7a	5.7c	3.6a	1.6ab	0.6a	6.7d	2.3a	0.7a	0.2a	10.4de
San Isidro	11.4	8.6	2.5	4.7	7.8bc	5.8bcd	1.7bcd	4.60	4.7d	2.7c	0.9e	5.2a	4.1bc	1.9bc	0.7bcd	5.7abcd	2.5abc	0.5bc	0.3bc	9.7cd
Cuf 101	11.3	8.5	2.4	4.70	7.7bcd	5.7cd	1.7bcd	4.60	4.1bcd	1.9bc	0.7bcde	5.7bc	3.8c	1.8d	0.6d	6.5a	2.3bc	0.6c	0.3cd	8.8abc
Atlixco	13.1	10.7	2.9	4.50	7abc	5.1ab	1.5ab	4.70	4.1abc	2.3bc	0.8ab	5.5bc	3.3ab	1.2bc	0.5ab	7.1cd	2.3a	0.4a	0.2a	9.6e
Oaxaca	12.9	10.5	2.9	4.60	7.5abc	5.4bc	1.6abc	4.70	3.7abc	1.7ab	0.6abc	6.3bc	3.9ab	2bc	0.7abc	6.1bcd	2.8bc	1bc	0.3cd	8.4abc
San Miguel	12.3	9.7	2.7	4.60	6.3d	4.6d	1.4d	4.70	4.4bcd	2.2bc	0.8bcd	5.5b	3.6bc	1.2d	0.5cd	6.7ab	2.1c	0.2c	0.2d	11a
Media	12.5	10	2.8	4.60	7.50	5.60	1.60	4.70	4.50	2.50	0.80	5.40	40	1.90	0.70	6.10	2.70	0.80	0.30	8.80

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p < 0.05$). Valores de gi (1×10^{-2}) y EUA (1×10^{-3}).

ANEXO C

Cuadro C1. Evapotranspiración (kg de H₂O) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									Media
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	
R₁										
Genex	4.61a	4.18a	5.87a	4.52ab	5.12a	5.38a	6.41a	10.52a	7.94a	6.06
Atlixco	4.26abc	4.03a	5.16b	4.44abc	4.99ab	4.90ab	6.29a	10.52a	7.27ab	5.76
Júpiter	4.58ab	3.99ab	5.28b	4.69a	4.92abc	4.65bc	6.19ab	10.79a	7.08ab	5.80
Oaxaca	4.45abc	4.04a	5.33b	4.34bcd	5.10a	4.89ab	5.89abc	10.14ab	6.85bcd	5.67
San Miguel	4.31abc	4.00ab	5.19b	4.40abc	4.86abcd	4.90ab	5.60bc	10.38ab	5.96de	5.51
Milenia	4.09bcd	3.97abc	4.95bc	4.13cd	4.58abcd	4.42bcd	6.07ab	9.88bc	6.84bcd	5.44
Victoria	3.98cd	3.93abc	5.04b	4.31bcd	4.30cd	4.33bcd	5.58bc	9.01c	5.97de	5.16
Cuf 101	4.19abcd	3.70bcd	5.09b	4.05d	4.66abcd	4.42bcd	5.8abc	9.50c	7.03abc	5.38
Aragón	3.18e	3.43d	4.58c	3.43e	4.38bcd	4.07cd	5.35c	9.17c	5.99cde	4.84
San Isidro	3.69de	3.67cd	4.08d	3.64e	4.24d	3.84d	4.46d	9.20c	5.52e	4.70
Media	4.13	3.89	5.06	4.19	4.71	4.58	5.76	9.91	6.64	
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
R₂										
Genex	5.29ab	6.12a	6.85ab	6.60a	6.15ab	16.29a	8.84ab	6.85a	6.50a	7.72
Atlixco	5.54a	6.12a	7.05a	6.01abcd	6.24a	13.37abc	9.62a	6.22abc	6.15abcd	7.37
Júpiter	5.15abc	5.98a	6.44abcde	6.47a	5.91abc	15.50ab	8.62ab	6.35abc	6.40ab	7.42
Oaxaca	4.90bc	5.85ab	6.33abcde	6.36abc	6.03ab	13.45abc	8.42ab	6.79ab	5.61bcd	7.08
San Miguel	5.08abc	5.79ab	6.75abc	6.41ab	5.90abc	14.09abc	7.87b	5.62cde	6.21abc	7.08
Milenia	5.51a	6.38a	6.56abcd	5.94abcd	6.13ab	14.19abc	8.45ab	6.14abcd	5.75abcd	7.23
Victoria	4.70c	5.28bc	5.95bcde	5.35d	5.46c	12.88abcd	6.5c	5.22de	6.04abcd	6.38
Cuf 101	4.81bc	4.87c	6.21bcde	5.84abcd	5.50c	12.18bcd	8.44ab	5.87bcd	5.47cd	6.58
Aragón	4.73c	5.75ab	5.79de	5.62bcd	5.69bc	9.26d	5.37c	4.86e	5.34d	5.82
San Isidro	4.71c	5.03c	5.63e	5.53cd	5.70bc	11.18cd	5.43c	3.88f	4.27e	5.71
Media	5.04	5.72	6.35	6.01	5.87	13.24	7.75	5.78	5.77	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro C2. Evapotranspiración (kg de H₂O) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	Media
S ₁										
Genex	4.64ab	4.58a	5.37ab	4.40a	4.99b	4.92a	6.20a	3.86c	3.91ab	4.76
Atlixco	4.18abc	4.19b	5.29ab	4.43a	5.45a	4.89a	6.24a	4.01bc	4.02a	4.74
Júpiter	4.66a	4.06bc	5.41ab	4.52a	4.89bc	4.72a	6.16ab	4.10b	3.87ab	4.71
Oaxaca	4.03cd	3.25f	5.23ab	4.66a	5.11b	4.79a	6.09ab	4.81a	3.22cd	4.58
San Miguel	4.14bcd	3.91cd	5.45a	4.54a	4.87bc	5.04a	5.81abc	4.03bc	3.89ab	4.63
Milenia	3.90cd	3.94bcd	4.95bc	3.72d	4.49de	4.09cd	5.32cd	3.92bc	4.00a	4.26
Victoria	3.96cd	3.62e	4.58cd	4.08b	4.56d	4.64ab	5.75abc	3.95bc	3.28bcd	4.27
Cuf 101	3.29e	3.75de	4.61cd	4.06bc	4.70cd	4.09cd	4.93d	4.05bc	3.42abcd	4.10
Aragón	4.01cd	3.69de	5.02abc	3.86bcd	4.85bc	4.22bc	5.66bc	3.97bc	3.77abc	4.34
San Isidro	3.64de	3.58e	4.44d	3.78cd	4.24e	3.66d	4.85d	4.06bc	2.98d	3.91
Media	4.04	3.86	5.03	4.20	4.82	4.51	5.70	4.07	3.63	
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
S ₂										
Genex	4.26a	4.76a	5.26a	6.06a	5.22ab	4.39c	5.68ab	5.16a	4.73ab	5.06
Atlixco	3.98abc	4.72a	5.01ab	5.84ab	5.33a	4.54bc	5.34ab	4.71ab	4.75ab	4.91
Júpiter	4.06ab	4.62ab	5.04ab	5.90ab	5.19ab	4.64b	5.55ab	4.67ab	5.08a	4.97
Oaxaca	3.93abc	4.15abc	4.49abc	5.30bc	4.84abc	5.36a	5.25ab	4.26bc	4.22de	4.64
San Miguel	3.13d	3.88bcd	4.44bc	4.87cd	4.77bc	4.57bc	4.88bc	4.66ab	4.49bcd	4.41
Milenia	3.94abc	4.27abc	5.03ab	5.86ab	5.00ab	4.46bc	5.97a	4.80a	4.61bc	4.88
Victoria	3.22d	3.78cd	4.08c	4.68d	4.79bc	4.49bc	4.26c	3.84cd	4.22de	4.15
Cuf 101	3.43bcd	4.27abc	4.99ab	5.76b	5.13ab	4.58bc	5.24ab	4.23bc	4.43bcde	4.67
Aragón	3.32cd	4.03abcd	4.54sbc	4.39d	4.75bc	4.50bc	4.87bc	3.68d	4.24cde	4.26
San Isidro	2.99d	3.24d	3.81c	4.67d	4.44c	4.59bc	4.31c	3.93cd	4.05e	4.00
Media	3.63	4.17	4.67	5.33	4.95	4.61	5.13	4.39	4.48	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro C3. Transpiración (kg de H₂O) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	Media
R ₁										
Genex	3.84a	3.45a	5.15a	3.56ab	4.15a	4.39a	5.49a	8.06a	7.22a	5.03
Atlixco	3.49ab	3.30a	4.44b	3.48abc	4.02ab	3.91ab	5.38a	8.07a	6.55ab	4.74
Júpiter	3.80a	3.26a	4.56b	3.73a	3.96abc	3.66bc	5.28ab	8.34a	6.37ab	4.77
Oaxaca	3.68ab	3.31a	4.61b	3.38bcd	4.14a	3.90ab	4.97abc	7.69abc	6.12bcd	4.64
San Miguel	3.53ab	3.26a	4.47b	3.44abc	3.9abcd	3.92ab	4.68bc	7.93ab	5.24de	4.49
Milenia	3.31bc	3.24a	4.23bc	3.17cd	3.62abcd	3.43bcd	5.16ab	7.42abcd	6.11bcd	4.41
Victoria	3.20bc	3.19ab	4.32b	3.35bcd	3.34cd	3.34bcd	4.66bc	6.56d	5.24de	4.24
Cuf 101	3.42ab	2.96bc	4.37b	3.09d	3.7abcd	3.43bcd	4.88abc	7.05bcd	6.31abc	4.36
Aragón	2.41d	2.69c	3.86c	2.47e	3.42bcd	3.08cd	4.44c	6.72cd	5.26cde	3.82
San Isidro	2.91c	2.93bc	3.36d	2.68e	3.28d	2.85d	3.54d	6.67d	4.80e	3.67
Media	3.36	3.16	4.34	3.23	3.75	3.59	4.85	7.45	5.92	
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
R ₂										
Genex	4.50ab	5.43a	6.09ab	5.66a	5.22ab	13.79a	7.40ab	6.07a	5.72a	6.65
Atlixco	4.74a	5.43a	6.27a	5.07abc	5.32a	10.81abc	8.17a	5.45abc	5.38abcd	6.29
Júpiter	4.33abc	5.29a	5.66abcd	5.53a	5.00abc	12.98ab	7.15ab	5.6abc	5.61ab	6.44
Oaxaca	4.10bc	5.15ab	5.56abcd	5.42ab	5.10ab	10.89abc	6.98ab	6.01ab	4.86bcd	6.01
San Miguel	4.27abc	5.09ab	5.97abc	5.47ab	4.97abc	11.52abc	6.43b	4.83cde	5.44abc	6.00
Milenia	4.70a	5.69a	5.80abcd	5.00abc	5.22ab	11.57abc	7.00ab	5.36abcd	4.96abcd	6.14
Victoria	3.91c	4.59bc	5.19cd	4.41c	4.54c	10.38abcd	5.10c	4.45de	5.27abcd	5.32
Cuf 101	4.01bc	4.18c	5.45bcd	4.90abc	4.59c	9.66bcd	6.98ab	5.11bcd	4.70cd	5.51
Aragón	3.94c	5.05ab	5.03d	4.68bc	4.77bc	6.74d	3.93c	4.08e	4.56d	4.75
San Isidro	3.88c	4.33c	4.86e	4.58c	4.74bc	8.55cd	3.93c	3.13f	3.48e	4.61
Media	4.24	5.02	5.59	5.07	4.95	10.69	6.31	5.01	5.00	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro C4. Transpiración (kg de H₂O) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	Media
S ₁										
Genex	3.90a	3.81a	4.63ab	3.49a	3.98bc	3.95a	5.26a	1.41d	3.14a	3.73
Atlixco	3.45ab	3.42b	4.55ab	3.51a	4.43a	3.92a	5.30a	1.55bcd	3.25a	3.71
Júpiter	3.92a	3.30bc	4.67a	3.60a	3.88bcd	3.75a	5.22ab	1.65b	3.10ab	3.68
Oaxaca	3.30bc	2.49g	4.49ab	3.74a	4.10b	3.82a	5.15ab	2.35a	2.45cd	3.54
San Miguel	3.41b	3.14cde	4.71a	3.62a	3.86bcd	4.08a	4.87abc	1.58bc	3.12ab	3.60
Milenia	3.16bc	3.18cd	4.21bc	2.80d	3.48ef	3.12cd	4.38cd	1.47cd	3.23a	3.23
Victoria	3.22bc	2.86f	3.84cd	3.16b	3.55e	3.67ab	4.81abc	1.50bcd	2.51bcd	3.24
Cuf 101	2.56d	2.98def	3.87cd	3.14bc	3.69de	3.12cd	3.99d	1.59bc	2.65abcd	3.07
Aragón	3.27bc	2.93ef	4.28abc	2.94bcd	3.84cd	3.25bc	4.72bc	1.51bcd	3.00abc	3.30
San Isidro	2.91cd	2.82f	3.70d	2.86cd	3.23f	2.69d	3.91d	1.60bc	2.21d	2.88
Media	3.31	3.09	4.29	3.29	3.80	3.54	4.76	1.62	2.87	
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
S ₂										
Genex	3.54a	4.01a	4.50a	5.09a	4.27ab	1.86d	4.24ab	4.43a	3.96ab	3.99
Atlixco	3.26abc	3.96a	4.25ab	4.87ab	4.38a	2.00bcd	3.89abc	3.98abc	3.98ab	3.84
Júpiter	3.33ab	3.86ab	4.27ab	4.92a	4.23ab	2.10b	4.18abc	3.94abc	4.29a	3.90
Oaxaca	3.21abc	3.39abc	3.71abc	4.29bc	3.88abc	2.82a	3.81abc	3.52cd	3.45cd	3.56
San Miguel	2.41d	3.12bcd	3.67bc	3.89cd	3.83bc	2.03bc	3.38cd	3.91bc	3.72bc	3.33
Milenia	3.22abc	3.51abc	4.26ab	4.89ab	4.05ab	1.92cd	4.58a	4.08ab	3.81bc	3.82
Victoria	2.49d	3.03cd	3.31c	3.71cd	3.85bc	1.95bcd	2.8d	3.10de	3.45cd	3.08
Cuf 101	2.70bcd	3.5abc	4.23ab	4.79ab	4.19ab	2.05bc	3.80abc	3.47cd	3.66bcd	3.60
Aragón	2.60cd	3.27abcd	3.77abc	3.42d	3.81bc	1.96bcd	3.42bcd	2.94e	3.44cd	3.18
San Isidro	2.27d	2.47d	3.04c	3.66d	3.48c	2.05bc	2.94d	3.19de	3.28d	2.93
Media	2.90	3.41	3.90	4.35	4.00	2.07	3.70	3.65	3.70	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro C5. Eficiencia transpiratoria (g de MS/kg de H₂O) en riego R₁ (112 a 434 ddt) y R₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									Media
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	
R₁										
Genex	1.71a	1.64a	1.87a	1.66a	1.76a	1.79a	1.90a	2.01ab	1.99a	1.81
Atlixco	1.63ab	1.60a	1.80b	1.65ab	1.73abc	1.72ab	1.89a	2.01ab	1.96a	1.78
Júpiter	1.71a	1.60a	1.81b	1.70a	1.73abc	1.68abcd	1.88ab	2.02a	1.94abc	1.79
Oaxaca	1.68ab	1.61a	1.82ab	1.63abc	1.75ab	1.71abc	1.85abc	2.00abc	1.94abc	1.78
San Miguel	1.65ab	1.60a	1.80b	1.63abc	1.72abc	1.73ab	1.83abc	2.01ab	1.87d	1.76
Milenia	1.61b	1.60a	1.77bc	1.57bc	1.66abcd	1.64bcd	1.87abc	1.99abc	1.94abc	1.74
Victoria	1.59bc	1.58ab	1.78b	1.62abc	1.61cd	1.58cde	1.81cb	1.95d	1.88cd	1.71
Cuf 101	1.63ab	1.52bc	1.79b	1.55c	1.69abcd	1.64bcd	1.84abc	1.98bcd	1.95ab	1.73
Aragón	1.32d	1.44d	1.72c	1.34e	1.63bcd	1.55de	1.80c	1.97cd	1.88bcd	1.63
San Isidro	1.50c	1.51c	1.62d	1.43d	1.58d	1.48e	1.65d	1.97cd	1.82d	1.62
Media	1.60	1.57	1.78	1.58	1.69	1.65	1.83	1.99	1.92	1.81
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
R₂										
Genex	1.81abc	1.89a	1.94a	1.91a	1.88ab	2.07a	1.99a	1.93a	1.91a	1.93
Atlixco	1.83a	1.89a	1.95a	1.86abcd	1.89a	2.06a	2.02a	1.89ab	1.89ab	1.92
Júpiter	1.78abc	1.88a	1.91a	1.90a	1.86abcd	2.06a	1.99a	1.91ab	1.90a	1.91
Oaxaca	1.76bcd	1.87ab	1.90ab	1.89abc	1.86abc	2.06a	1.97a	1.93a	1.84abc	1.90
San Miguel	1.78abc	1.87ab	1.93a	1.89ab	1.86abcd	2.06a	1.95a	1.84abc	1.89a	1.90
Milenia	1.83ab	1.91a	1.92a	1.85abcd	1.88ab	2.06a	1.97a	1.89ab	1.85abc	1.91
Victoria	1.72d	1.80bc	1.86bc	1.79d	1.81d	2.04b	1.86b	1.80bc	1.88abc	1.84
Cuf 101	1.74cd	1.77c	1.89abc	1.85abcd	1.82cd	2.02bc	1.98a	1.87ab	1.82bc	1.86
Aragón	1.72d	1.86b	1.86bc	1.82bcd	1.84bcd	1.96c	1.72c	1.73c	1.81c	1.81
San Isidro	1.72d	1.79c	1.84c	1.81cd	1.83bcd	2.03c	1.73c	1.57d	1.65d	1.77
Media	1.77	1.85	1.90	1.86	1.85	2.04	1.92	1.84	1.85	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

Cuadro C6. Eficiencia transpiratoria (g de MS/kg de H₂O) en sequía S₁ (112 a 434 ddt) y S₂ (462 a 798 ddt) en promedio de 10 variedades de alfalfa, bajo condiciones de invernadero. Montecillo, Texcoco, Edo. México.

Genotipos	Días después del trasplante									
	112	140	175	210	245	280	315	406	434	Media
S ₁										
Genex	1.72ab	1.71a	1.82a	1.65a	1.74bc	1.73a	1.88a	3.22a	1.57ab	1.89
Atlixco	1.64abc	1.64b	1.81a	1.65a	1.80a	1.72a	1.88a	2.73ab	1.60a	1.83
Júpiter	1.73a	1.61b	1.82a	1.67a	1.72bc	1.70ab	1.88a	2.62b	1.56ab	1.81
Oaxaca	1.61abcd	1.35e	1.80a	1.69a	1.75ab	1.71a	1.87a	1.46d	1.31bc	1.62
San Miguel	1.63abc	1.57bc	1.83a	1.67a	1.72bc	1.75a	1.84a	2.49bc	1.38abc	1.76
Milenia	1.57cd	1.58bc	1.77ab	1.47c	1.65d	1.56c	1.78bc	2.72ab	1.59a	1.74
Victoria	1.58cd	1.49d	1.70c	1.58b	1.66d	1.68ab	1.84ab	2.62b	1.37abc	1.72
Cuf 101	1.36e	1.53cd	1.71bc	1.57b	1.69cd	1.55c	1.74cd	1.98cd	1.42abc	1.62
Aragón	1.59bcd	1.51cd	1.78ab	1.51bc	1.71bc	1.60bc	1.83ab	2.65ab	1.53abc	1.75
San Isidro	1.50d	1.48d	1.69c	1.49c	1.59e	1.43d	1.72d	1.87d	1.22c	1.55
Media	1.59	1.55	1.77	1.60	1.70	1.64	1.83	2.44	1.45	
	462	490	518	553	588	686	742	770	798	
S ₂										
Genex	1.47abc	1.74a	1.81	1.87a	1.78	3.62a	1.77ab	1.80a	1.73ab	1.95
Atlixco	1.60ab	1.73a	1.78	1.85ab	1.79	3.20ab	1.72ab	1.73ab	1.73ab	1.90
Júpiter	1.61a	1.72ab	1.78	1.85ab	1.77	2.89abc	1.77ab	1.73ab	1.78a	1.88
Oaxaca	1.58ab	1.48cd	1.54	1.75bc	1.70	1.99def	1.69ab	1.66bc	1.64cd	1.67
San Miguel	1.30c	1.55c	1.68	1.71cd	1.71	1.93defe	1.63bc	1.72ab	1.69bc	1.66
Milenia	1.58ab	1.65b	1.78	1.85ab	1.75	3.72a	1.82a	1.75a	1.71abc	1.96
Victoria	1.36bc	1.53c	1.59	1.69cd	1.72	2.2cde	1.46d	1.56de	1.64cd	1.64
Cuf 101	1.44abc	1.64b	1.77	1.84ab	1.77	2.62bcd	1.69ab	1.65bcd	1.68bc	1.79
Aragón	1.40abc	1.58bc	1.69	1.63d	1.71	1.59ef	1.63bc	1.52e	1.64cd	1.60
San Isidro	1.25c	1.30d	1.54	1.67cd	1.63	1.32f	1.51cd	1.58cde	1.60d	1.49
Media	1.46	1.59	1.69	1.77	1.73	2.51	1.67	1.67	1.69	

abcde: Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).