

Nota técnica

RELACIONES HÍDRICAS Y TEMPERATURAS ALTAS EN FRIJOL DEL TIPO “FLOR DE MAYO”¹

Edwin Javier Barrios-Gómez*, Cándido López-Castañeda^{2/*}, Josué Kohashi-Shibata^{**}

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., potencial hídrico, osmótico y de turgencia, ajuste osmótico, calor, temperatura del frijol Flor de Mayo, riego, secano.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., water, osmotic and turgor potentials, osmotic adjustment, heat, canopy temperature, irrigation, rainfed.

Recibido: 15/06/10

Aceptado: 08/03/11

RESUMEN

Se estudió el efecto del déficit hídrico del suelo y temperatura alta del aire en las relaciones hídricas y temperatura del dosel del cultivo (Tc), rendimiento de semilla (RS) y sus componentes en 8 variedades de frijol del tipo “Flor de Mayo” (FM) y una variedad criolla. Se realizaron 3 experimentos de campo; Montecillo en riego (MR) con la aplicación de agua de la siembra a la madurez, Montecillo en secano (MS) con la lluvia como fuente única de humedad y Celaya en secano (CS) con lluvia y 2 riegos suplementarios en floración. Se utilizó una dosis de fertilización de 80 kg.ha⁻¹ de nitrógeno y 40 kg.ha⁻¹ de fósforo. En MR el potencial hídrico foliar ($\psi=-0,33$ Mpa), osmótico ($\pi=-1,26$ Mpa) y de turgencia ($P=0,93$ Mpa) fue más alto que en CS ($\psi=-0,77$, $\pi=-1,36$ y $P=0,59$ Mpa) y MS ($\psi=-1,22$, $\pi=-1,57$ y $P=0,35$ Mpa); MS, con mayor deficiencia hídrica del suelo, tuvo mayor reducción en ψ y π , y mayor grado de ajuste osmótico (AO=0,70 Mpa). El AO estuvo positiva y significativamente asociado con RS y

ABSTRACT

Water relationships and high temperatures in “Flor de Mayo” type beans. Soil water deficit and high air temperature effects on plant water relations and canopy temperature (CT), and seed yield (SY) and its components in 8 “Flor de Mayo” (FM) bean varieties and a landrace were studied. Three experiments were carried on under field conditions; Montecillo irrigation (MI) with watering from sowing to maturity, Montecillo rain-fed (MRF) with rainfall as the only source of water and Celaya rain-fed (CRF) with rainfall + 2 supplementary waterings at flowering. Rates of 80 kg.ha⁻¹ Nitrogen and 40 kg.ha⁻¹ Phosphorous were used. Leaf water ($\psi=-0.33$ Mpa), osmotic ($\pi=-1.26$ Mpa) and turgor ($P=0.93$ Mpa) potentials at MI were higher than at CRF ($\psi=-0.77$, $\pi=-1.36$ y $P=0.59$ Mpa) and MRF ($\psi=-1.22$, $\pi=-1.57$ y $P=0.35$ Mpa); MRF with a greater soil water deficit, showed greater reduction in ψ and π and higher capacity for osmotic adjustment (OA). OA was positive and significantly related to seed

1 Trabajo de Investigación realizado por el primer autor para obtener el grado de Doctor en Ciencias.

2 Autor para correspondencia. Correo electrónico: clc@colpos.mx

* Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, México.

** Posgrado en Recursos Naturales-Botánica, Colegio de Postgraduados, km 36,5 Carretera México- Texcoco, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56230.

biomasa aérea final (BMAF) en los 2 ambientes de secano. La T_c en MR (26,7°C) fue más baja que en CS (30,8°C) y MS (36,6°C); el estrés por calor se agudizó con el descenso en el contenido hídrico de las plantas en el ambiente más seco (MS); T_c se relacionó negativa y significativamente con ψ y π en MS. La alta T_c también tuvo efecto significativo en la producción de BMAF y RS y sus componentes; la alta T_c redujo el RS, BMAF, número de vainas normales.m⁻² (VN.m⁻²) y peso de 100 semillas (P100S) en 12,5, 10,7, 10,2 y 3,4% por cada °C (-1 °C) de aumento en la T_c , respectivamente.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de humedad en el suelo es uno de los principales factores limitantes del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos, en los sistemas agrícolas de secano en extensas áreas del mundo. También las temperaturas altas o calor durante la estación de crecimiento, reducen severamente el rendimiento de grano y pueden acentuar el efecto del estrés hídrico en las etapas fenológicas más sensitivas del cultivo. El potencial hídrico (ψ) y la capacidad de ajuste osmótico (AO) son características fisiológicas que pueden utilizarse eficazmente, para mejorar la tolerancia a sequía en frijol y otros cultivos (Nayyar et al. 2005). El estatus hídrico de las plantas cultivadas generalmente se define en términos de su contenido de agua (ψ) o sus componentes, potencial osmótico (π) y potencial de turgencia (P) (Turner 1986). Estos parámetros hídricos guardan estrecha relación con la tasa de transpiración y los procesos de flujo del agua en el sistema vascular de la planta. Los procesos fisiológicos del crecimiento están más relacionados con el comportamiento de los potenciales π y P , particularmente cuando las plantas están sujetas a variaciones en el contenido de humedad del suelo. La acumulación activa de solutos dentro de la planta y la disminución del π en el citoplasma de las células, ocurren

yield (SY) and final aerial biomass (FABM) in the 2 rain-fed environments. Canopy temperature (CT) at MI (26.7°C) was lower than at CRF (30.8°C) and MRF (36.6°C); the heat stress effect increased with the drop in plant water content in the driest environment (MRF); CT was negative and significantly associated with ψ and π at MRF. The high CT also had a significant effect in the FABM and SY, and its components; high CT reduced SY, FABM, number of normal pods.m⁻² (NP.m⁻²) and weight of 100 seeds (W100S) by 12.5, 10.7, 10.2 y 3.4% for each °C (-1 °C) increase in CT, respectively.

cuando el déficit hídrico del suelo disminuye el flujo de agua al interior de las raíces y atrae agua al interior de la célula para mantener la turgencia, proceso fisiológico conocido como ajuste osmótico (Nayyar y Walia 2004).

El aumento en la tensión hídrica al disminuir el π ayuda a mantener la fuerza de tensión para extraer más agua del suelo, estimular el crecimiento de la raíz (Morgan y Condon 1986) y facilitar la removilización de reservas acumuladas en la planta antes de la floración, a la semilla durante el periodo de llenado del grano (Subbarao et al. 2000). Diversos estudios han mostrado la capacidad del frijol, para desarrollar ajuste osmótico en condiciones de estrés hídrico en ambientes controlados (Stoyanov 2005) y de campo (Martínez et al. 2007).

Las temperaturas altas del aire también afectan los diferentes procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas; p.e., las temperaturas altas pueden reducir la tasa de fotosíntesis a través de cambios en la membrana, organización estructural y propiedades físico-químicas de los tilacoides (Berry and Bjorkman 1980). Las temperaturas altas (>30°C en el día o >20°C en la noche) en la etapa de anthesis y establecimiento del número de semillas, disminuyen la producción de frijol cuando la humedad relativa es baja, ya que las temperaturas altas nocturnas, tienen efectos más adversos que las temperaturas altas

en el día (Singh 2005). Las temperaturas altas reducen la viabilidad del polen, el crecimiento del tubo polínico y la fertilización del ovario (Hall 2004); aceleran la tasa de desarrollo de la planta y acortan el periodo de crecimiento de los órganos reproductores (Gan et al. 2004), causan excesivo aborto de flores y vainas jóvenes (Leport et al. 2006), aceleran el llenado del grano (Boote et al. 2005), reducen el número de semillas por vaina, el tamaño de semilla y el rendimiento (Leport et al. 2006).

Es común que el estrés causado por las deficiencias hídricas y calor se presente con frecuencia en forma simultánea en las etapas fenológicas más sensitivas de la planta para la formación del rendimiento; p.e., inicio de la floración, inicio de crecimiento de las vainas y llenado de grano en las áreas de secano; estos estreses abióticos disminuyen el rendimiento y calidad de la producción (Rainey y Griffiths 2005). El mejoramiento genético del rendimiento de frijol en estas condiciones se podría lograr al seleccionar genotipos con mecanismos fisiológicos de adaptación a sequía y calor que contribuyan a mantener la turgencia del aparato fotosintético y la actividad metabólica relacionada con la fijación del CO₂, lo que contribuirá a mantener la tasa de crecimiento de raíces y órganos aéreos, y se reflejará en mayor producción de biomasa y rendimiento de semilla.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar la respuesta de un grupo de variedades de frijol tipo “Flor de Mayo” a la sequía y calor en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de los experimentos

Se llevaron a cabo 3 experimentos en el ciclo primavera-verano (PV) del 2007; uno en el Campo Agrícola Experimental del Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Celaya, Guanajuato, México (20° 34' N, 100° 50' O y 1765 msnm) y los otros 2 en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México (19° 21' N, 98° 55' O y 2250 msnm).

Material genético

Se incluyeron 8 variedades de frijol tipo “Flor de Mayo” (FM) que se utilizan en la siembra comercial bajo riego y secano con buena precipitación en la región templada sub-húmeda (Acosta-Gallegos et al. 2000, Rosales et al. 2004) y la variedad criolla Michoacán 128 de hábito indeterminado procedente del Estado de Michoacán, México (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variedades de frijol tipo “Flor de Mayo” utilizadas en los 3 experimentos de campo. 2007.

Variedad ^δ	Año de liberación	Hábito de crecimiento	Días a floración
“Flor de Mayo” M38	1994	III	50-57
“Flor de Mayo” Corregidora	2000	III	56
“Flor de Mayo” Sol	1996	III	45-51
“Flor de Mayo” RMC	1981	III	44-55
“Flor de Mayo” Bajío	1989	III	45-47
“Flor de Mayo” Noura	2006	III	47-50
“Flor de Mayo” Anita	2002	III	44 [‡] y 62 [€]
“Flor de Mayo” 2000	2001	III	45-50
Michoacán 128 (Criollo) [§]	1974 [#]	III	47-53

^δ=Las variedades de tipo Flor de Mayo fueron proporcionadas por el Programa de Frijol, INIFAP, Celaya, Guanajuato.

[§]=Material criollo proveniente de Michoacán, proporcionado por el Dr. Salvador Miranda Colín, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México; [‡]Ciclo de primavera-verano; [€]Ciclo de otoño-invierno. [#]=Año de colecta.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones para los 3 experimentos; la unidad experimental consistió de 2 surcos de 4 m de longitud y 0,80 m de ancho. Se aplicó una dosis de fertilización de 40-40-00 de NPK en la primera escarda a los 30 días después de la siembra (dds) y 40-00-00 en la segunda a los 40 dds. En Celaya en secano, se aplicó un riego antes de la siembra y ésta se realizó el 3 de abril de 2007 en hileras en el fondo del surco a 4 cm de profundidad; 15 dds se hizo un aclareo para ajustar la población a una densidad de 150 000 plantas.ha⁻¹; 20 dds se aplicó un riego por gravedad para favorecer el establecimiento de las plántulas y 2 riegos suplementarios durante la floración (55 y 65 dds), debido a la ausencia de lluvias. En Montecillo, los experimentos se sembraron el 12 de abril de 2007; en riego se aplicó agua de acuerdo con las necesidades del cultivo durante el ciclo hasta la madurez y en secano, la aplicación de agua se hizo solamente hasta los 24 dds (21 días antes de la floración) y posteriormente el desarrollo de las plantas se dejó a merced de la precipitación pluvial.

Variables

Temperatura del dosel del cultivo (T_c , °C); se midió diariamente a las 12:00 h entre los 50 y 70 dds, al utilizar un termómetro infrarrojo (modelo Raytek Spectrum Technologies, Inc.) a una distancia de 0,4 m del dosel del cultivo y en ángulo de 45°; prevalecieron condiciones de alta radiación solar (1800 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) y calma (velocidad del viento <5 km.h⁻¹) durante las mediciones en cada unidad experimental.

Temperatura del aire (T_a , °C); se midió simultáneamente con la T_c , al colocar un termómetro de máxima y mínima de columna de mercurio (marca Brennan, England) junto a las plantas, para estimar la temperatura del aire que rodeaba al dosel del cultivo, que evita la incidencia directa de la radiación solar sobre la superficie del termómetro.

Potencial hídrico foliar (ψ , Mpa); se midió cada 4 días a las 12:00 h entre los 50 y 70 dds en el foliolo central de 4 hojas trifoliadas completamente expandidas y expuestas a la radiación solar; los foliolos se colectaron y depositaron en bolsas de plástico con una porción de estopa húmeda en su interior y se llevaron a la bomba de presión, colocada bajo sombra en la cercanía del experimento para determinar el ψ ; el tiempo transcurrido entre la colecta de los foliolos y la medición del ψ fue de aproximadamente 2 min para cada unidad experimental.

Potencial osmótico (π , Mpa), se determinó en una porción de los foliolos utilizados para medir el ψ ; esta muestra de tejido foliar se colocó en viales de plástico de 1,5 ml, mismos que se depositaron en un termo con nitrógeno líquido (-195,8°C) para matar el tejido, romper la pared celular y facilitar la extracción de la savia; las mediciones del π se hicieron en las muestras de savia con un osmómetro marca Wescor, modelo 5100C en el laboratorio.

Potencial de turgencia (P , Mpa), se calculó como la diferencia entre el ψ y π ($P=\psi-\pi$) para cada muestra analizada (Begg y Turner 1976).

Ajuste osmótico (AO, Mpa); se calculó como la diferencia entre el π determinado en riego (π_R) y el π determinado en los ambientes de secano (π_S) ($AO=\pi_R-\pi_S$) para cada cultivar (Babu et al. 1999).

En la madurez fisiológica se cosechó la parte aérea de las plantas en 1,0 m lineal (0,8 m²) de cada unidad experimental, para determinar el rendimiento de semilla (RS, g.m⁻²) y sus componentes [vainas normales.m⁻² (VN.m⁻²), número de semillas normales.m⁻² (SN m⁻²) y peso de 100 semillas (P100S, g)] y la biomasa aérea final (BMAF, g.m⁻²).

Análisis estadístico

Se calculó el análisis de varianza para todas las variables medidas con el programa SAS versión 9.1 para Windows (SAS 2007) en forma individual para cada ambiente de humedad del suelo y en forma combinada de los 3 ambientes. La

comparación de medias se realizó, al calcular la diferencia significativa de Tukey (DSH, $p \leq 0,05$).

Datos meteorológicos

Los datos de precipitación y temperatura máxima y mínima se obtuvieron de la estación meteorológica del Campo Agrícola Experimental del Bajío (INIFAP) en Celaya, Guanajuato, México (Figura 1a) y la Estación Agrometeorológica del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México (Figura 1b), respectivamente; ambas localizadas a una distancia menor a

200 m de los sitios en los que se establecieron los experimentos. La temperatura máxima promedio durante la estación de crecimiento fue menor en Celaya (28,1°C) que en Montecillo (31,7°C), y la mínima fue menor en Montecillo (9,2°C) que en Celaya (11,9°C) (Figura 1a). Sin embargo, en ambos sitios la temperatura mínima estuvo por arriba de la temperatura base para frijol (8°C) (Barrios-Gómez y López-Castañeda 2009). La precipitación registrada entre la siembra y la cosecha fue 232 mm en Celaya, Guanajuato y 237 mm en Montecillo, Estado de México.

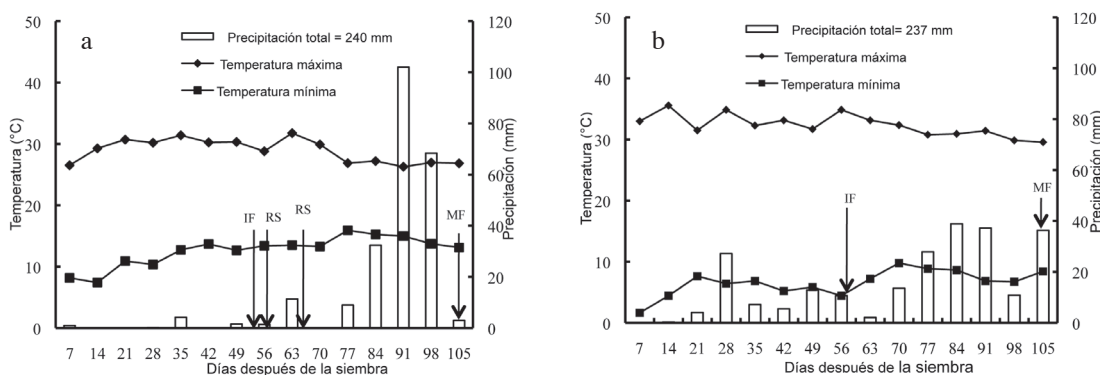


Fig. 1. Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada durante los experimentos de frijol en Celaya (a) y Montecillo (b). 2007.

Contenido de humedad del suelo

En Celaya se registró una severa deficiencia de lluvia durante las etapas de desarrollo vegetativo e inicio de la floración (entre los 35 y 49 dds; etapas de desarrollo R3-R4; CIAT 1982) (Figura 2a), que se reflejó en una marcada disminución en el contenido de humedad del suelo en la profundidad de 0 a 20 cm (Figura 2a), razón por la que se aplicaron riegos suplementarios a los 54 y 65 dds; posteriormente se presentaron lluvias abundantes (232 mm) hasta la madurez, lo que permitió tener altos rendimientos de semilla. Por el contrario, en Montecillo la distribución de la precipitación (237 mm) durante el ciclo biológico de las plantas fue muy irregular e insuficiente para satisfacer las necesidades hídricas de las

plantas (Figura 2d); ésta distribución irregular de la lluvia se reflejó en un bajo contenido de humedad del suelo en seco con niveles de humedad inferiores al PMP para los estratos de 0-20 (Figura 2d) y 20-40 cm (Figura 2e). Se ha estimado que aproximadamente el 50% de la densidad radical y acumulación de materia seca en las raíces de variedades comerciales de frijol, se localizan en la profundidad de 0 a 30 cm (Halterlein 1983) y sólo las raíces de variedades de frijol tolerantes a sequía pueden penetrar hasta 50 cm (White e Izquierdo 1991). No se detectaron porcentajes de humedad del suelo por abajo del PMP en las profundidades de 20-40 (Figura 2b) y 40-60 cm (Figura 2c) en Celaya en seco y en la profundidad de 40-60 cm (Figura 2f) en Montecillo en seco.

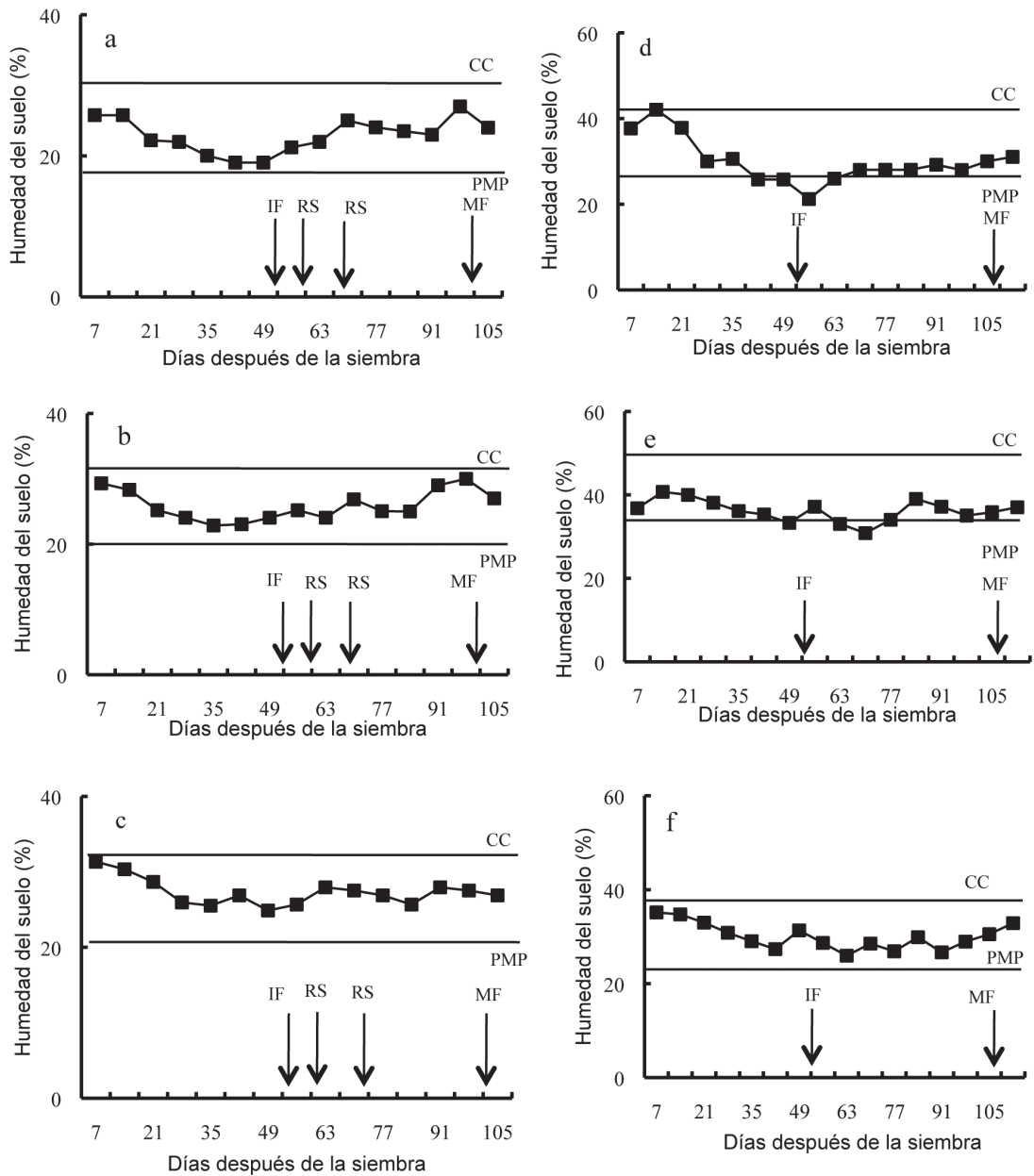


Fig. 2. Contenido de humedad del suelo en 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad en Celaya en seco (a, b y c) y Montecillo en seco (d, e y f) durante los experimentos de frijol, respectivamente. 2007. (Las líneas horizontales representan el valor de porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) del suelo en las diferentes profundidades; IF=Fecha promedio del inicio de la floración; MF=Fecha promedio de la madurez fisiológica; RA=Riego suplementario).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relaciones hídricas

Las deficiencias hídricas del suelo registradas en la profundidad de 0 a 20 cm fueron más severas en Montecillo en seco (MS) que en Celaya en seco (CS) y Montecillo en riego (MR); éstas deficiencias hídricas se reflejaron en fuertes variaciones en el status

hídrico de las plantas en los 3 ambientes. El potencial hídrico foliar (ψ), osmótico (π) y de turgencia (P) presentaron diferencias ($p \leq 0,01$) entre los 3 ambientes de humedad edáfica en promedio de todas las variedades y mediciones realizadas; en Montecillo en riego $\psi = -0,33$, $\pi = -1,26$ y $P = 0,93$ Mpa; en Celaya en seco $\psi = -0,77$, $\pi = -1,36$ y $P = 0,59$ Mpa, y en Montecillo en seco $\psi = -1,22$, $\pi = -1,57$ y $P = 0,35$ Mpa (Figura 3).

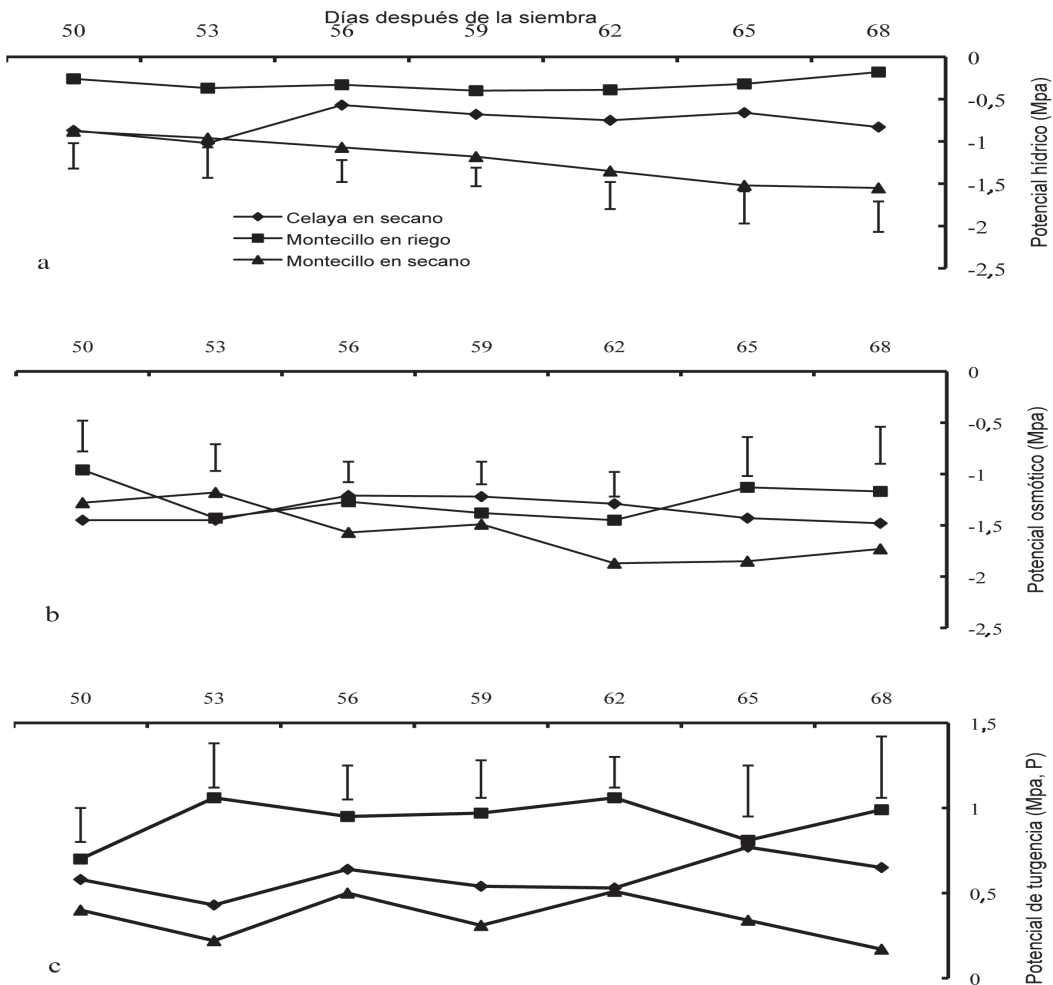


Fig. 3. Potencial hídrico (a), potencial osmótico (b) y potencial de turgencia (c), para frijol "Flor de mayo" y Michoacán 128, en Celaya en seco, Montecillo en riego y Montecillo en seco. 2007. (Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa de Tukey ($p \leq 0,05$) en cada fecha de medición).

El ψ en Montecillo en secano disminuyó conforme se redujo el contenido de agua en el suelo en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm, al registrar un valor de -1,55 Mpa en la última medición a los 68 dds, lo que se reflejó en síntomas severos de marchitez en las hojas entre las 12:00 y las 15:00 h (Figura 3); estos síntomas de estrés hídrico en las plantas indicaron la disminución en el ψ durante el periodo de deficiencias hídricas del suelo; la diferencia en ψ entre la primera medición (58 dds) y la última medición (68 dds) fue -0,72 Mpa (Figura 3). Un ambiente con deficiencia de agua en el suelo más severa, puede causar disminuciones más acentuadas en el ψ ; Morgan (1995) observó una diferencia en ψ de -1,5 Mpa entre los 50 y los 110 dds en trigo en condiciones de sequía en campo. En Celaya en secano el ψ registró su valor más bajo (-1,02 Mpa) a los 53 dds (Figura 3); posteriormente, mantuvo valores cercanos (-0,77 Mpa) a los observados en Montecillo en riego en promedio de todos los genotipos y mediciones, debido a que se le proporcionaron 2 riegos de auxilio (55 y 65 dds) por la falta de lluvia. Martínez et al. (2007) observaron que las plantas de frijol en sequía tuvieron un ψ de -1,4 Mpa y las plantas en riego un ψ de -0,9 Mpa en promedio de todos los cultivares en condiciones de campo; la diferencia entre el ψ observado en el presente estudio en riego (-0,33 Mpa) y el reportado por Martínez et al. (2007) (-0,9 Mpa), pudo deberse a que las plantas en éste último, estuvieron sometidas a mayores temperaturas del aire, que causaron altas tasas de transpiración y una mayor disminución en el ψ .

El π fue más alto en Montecillo en riego (-1,25 Mpa) y Celaya en secano (-1,28 Mpa) que en Montecillo en secano (-1,57 Mpa) y presentó diferencias ($p \leq 0,01$) entre los 3 ambientes de humedad del suelo a los 53, 62, 65 y 68 dds (Figura 3). Las plantas en Montecillo en secano alcanzaron sus π más bajos (-1,9 Mpa, 62 y 65 dds) en plena floración (etapas de desarrollo R4-R5; CIAT 1982), cuando las deficiencias de humedad en el suelo fueron más drásticas y las plantas presentaron síntomas más severos de marchitez en las hojas, en comparación con las plantas en

Celaya en secano y Montecillo en riego. Martínez et al. (2007) determinaron que el π del frijol en condiciones de campo disminuyó en mayor grado en sequía (-1,7 Mpa) que en riego (-1,5 Mpa); estos valores de π fueron más bajos que los observados en el presente estudio, debido posiblemente a un mayor grado de estrés por alta temperatura.

El P en Montecillo en secano y Celaya en secano fue más bajo que en Montecillo en riego a los 53, 56, 59 y 62 dds; después del segundo riego de auxilio (65 dds), el P en Celaya en secano fue similar al P en Montecillo en riego, mientras que el P en Montecillo en secano continuó en descenso, debido a las fuertes deficiencias de humedad del suelo hasta alcanzar un valor cercano a cero (0,15 Mpa) a los 68 dds. El mantenimiento de la turgencia puede lograrse a través de una mayor acumulación de solutos (más bajo π en el citoplasma de la célula) o por cambios en la elasticidad de la pared celular (Silva-Robledo et al. 2006). Parsons y Howe (1984) observaron que el frijol tepari (*Phaseolus acutifolius*) en condiciones de estrés hídrico, disminuyó sus potenciales ψ y π en mayor grado que el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), y esto le permitió mantener un mayor potencial de turgencia con un bajo contenido relativo de agua, debido a alguno de estos 3 factores; mayor elasticidad de sus tejidos, mayor acumulación activa de solutos o mayor concentración de solutos.

Ajuste osmótico

El π disminuyó considerablemente más en las plantas en Celaya en secano (-1,38 Mpa) y Montecillo en secano (-1,83 Mpa) que en Montecillo en riego (-1,13 Mpa) (Cuadro 2). La disminución en el π fue más acentuada en el ambiente de secano con mayores deficiencias hídricas del suelo, lo que se reflejó también en un mayor grado de AO; en Montecillo en secano, ambiente con mayores deficiencias hídricas del suelo durante la floración, el AO fue 0,70 Mpa, mientras que en Celaya en secano con deficiencias hídricas del suelo menos severas, el AO fue 0,25 Mpa en promedio de todos los genotipos (Cuadro 2). La disminución en el π de la planta se ha identificado como una de las estrategias

Cuadro 2. Potencial osmótico y ajuste osmótico para frijol tipo “Flor de Mayo” en Celaya en secano en Montecillo en riego, y Montecillo en secano. 2007.

Variedad	π (Mpa) [§]			AO (Mpa)	
	MR	CS	MS	CS	MS
FM Noura	-1,09	-1,47	-1,84	0,38	0,75
FM Anita	-1,06	-1,36	-1,94	0,30	0,88
FM M38	-1,04	-1,35	-1,92	0,31	0,88
FM Sol	-1,09	-1,48	-1,80	0,39	0,71
FM Bajío	-1,13	-1,32	-1,72	0,19	0,59
FM Corregidora	-0,98	-1,51	-1,83	0,53	0,85
FM 2000	-1,27	-1,34	-1,86	0,07	0,59
FM RMC	-1,28	-1,38	-1,89	0,10	0,61
Michoacán 128	-1,23	-1,25	-1,71	0,02	0,48
Media general	-1,13	-1,38	-1,83	0,25	0,70
DSH ($p \leq 0,05$)	0,09	-0,07	-0,12	0,08	0,11

más importantes para mantener la turgencia de la planta en sequía; en leguminosas se observó que cuando las plantas de frijol, garbanzo, haba y chícharo se sometieron a un déficit humedad equivalente a un potencial hídrico del suelo de -0,64 Mpa, el ψ foliar disminuyó a -0,34, -1,32, -1,67 y -1,83 Mpa y el rendimiento se redujo en 17,6, 14,5, 36,4 y 23,9%, respectivamente; la menor reducción en el rendimiento de garbanzo y frijol se debió a que en éstas especies, la turgencia se mantuvo alrededor de 1,0 Mpa a consecuencia de un aumento en la concentración de solutos que resultó de la pérdida de agua y la inhibición del crecimiento; en garbanzo fue importante además el tipo de solutos acumulados que en su mayoría fueron de origen orgánico; por ejemplo, azúcares y aminoácidos que contribuyeron con un 50 y 20% del total de la concentración de solutos orgánicos, y Calcio, el único elemento inorgánico que contribuyó con 19% (Amede y Schubert 2003). Al considerar que el AO es una respuesta inducida y su grado de expresión es afectado por la duración y la intensidad de la sequía es posible observar una respuesta diferencial entre genotipos en diferentes ambientes; por ejemplo, se ha determinado que tasas rápidas de deshidratación mostraron menores niveles de AO en sorgo (Jones y Rawson 1979). También en sorgo, se observó que la expresión del AO fue

más baja en invernadero que en campo, debido a que en ambientes controlados no puede mantenerse una demanda evaporativa uniforme y un rápido desarrollo del déficit hídrico puede impedir la síntesis y translocación de solutos osmóticos, de tal forma que la tasa de aumento del AO es incapaz de balancear la tasa de disminución del ψ (Basnayake et al. 1996).

La variación en AO entre genotipos estuvo relacionada positiva y significativamente con la variación en rendimiento de semilla (RS) ($RS=261(AO)+104$, $r=0,77$, $p \leq 0,01$, Figura 4a) y biomasa final aérea (BMFA) ($BMAF=455(AO)+251$, $r=0,74$, $p \leq 0,01$, Figura 4b) en promedio de los 2 ambientes de secano (Celaya en secano y Montecillo en secano). Los genotipos con mayor capacidad de AO (FM Noura, FM M38 y FM Anita) produjeron mayor rendimiento de semilla y biomasa aérea final. Morgan et al. (1991) determinaron en garbanzo (*Cicer arietinum* L.) que el AO en condiciones controladas estuvo asociado con la osmoregulación en campo en Nueva Gales del Sur, Australia, en varios experimentos y que los incrementos en rendimiento debido al aumento en el AO, variaron desde cero en ambientes con bajo déficit hídrico a 20% en ambientes con alto déficit hídrico. El mantenimiento del status hídrico de la planta de frijol es importante para la producción

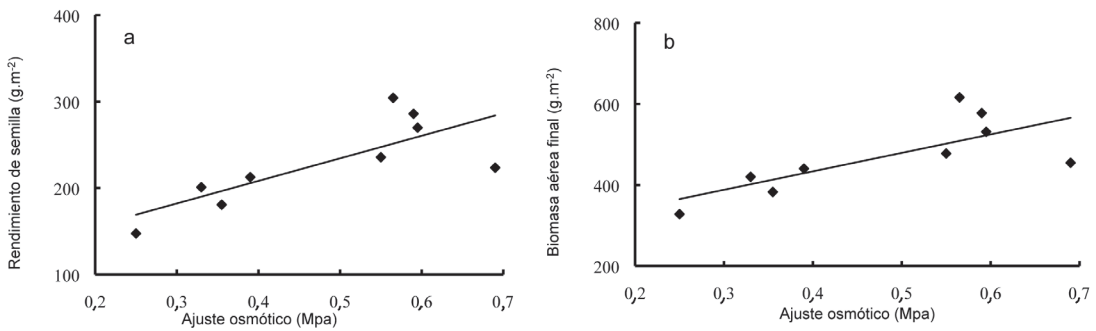


Fig. 4. Relación del ajuste osmótico con el rendimiento de semilla (a) y la biomasa aérea final (b) para frijol tipo "Flor de Mayo" y Michoacán 128, en promedio de Celaya en seco y Montecillo en seco. 2007.

de vainas y rendimiento de semilla, al mantener la actividad fotosintética y la extensión de los órganos y tejidos en condiciones de sequía y calor (Kumar et al. 2006). La variedad criolla (Michoacán 128) se caracterizó por presentar un P más bajo que los cultivares tipo "Flor de Mayo", durante el periodo de deficiencia de agua en el suelo en los 2 ambientes de seco, debido a su menor capacidad de ajuste osmótico.

Temperatura del aire y del dosel del cultivo

En Montecillo en riego las plantas tuvieron menor temperatura del dosel del cultivo (T_c , 26,7°C) que en Celaya en seco (30,8°C) y Montecillo en seco (36,6°C) (Figura 5a), y

esta se relacionó positiva y significativamente con la temperatura del aire (T_a , °C) en los 3 ambientes de humedad del suelo; Montecillo en riego, $T_a=0,91(T_c)+7,1$, $r=0,81$, $p\leq 0,01$; Celaya en seco, $T_a=0,82(T_c)+6,2$, $r=0,91$, $p\leq 0,01$, y Montecillo en seco ($T_a=1,03(T_c)-5,7$, $r=0,84$, $p\leq 0,01$) (Figura 4a), y en promedio de los 3 ambientes ($T_a=1,16(T_c)-4,8$, $r=0,96$, $p\leq 0,01$, Figura 5b). La T_c aumentó a medida que T_a se incrementó durante el periodo de medición entre las etapas R5 (50 dds) y R6 (70 dds) (CIAT 1982), sobre todo en los ambientes de Celaya en seco y Montecillo en seco, donde las plantas sufrieron niveles más altos de estrés hídrico (Figura 5a). En Montecillo en seco, ambiente con mayor

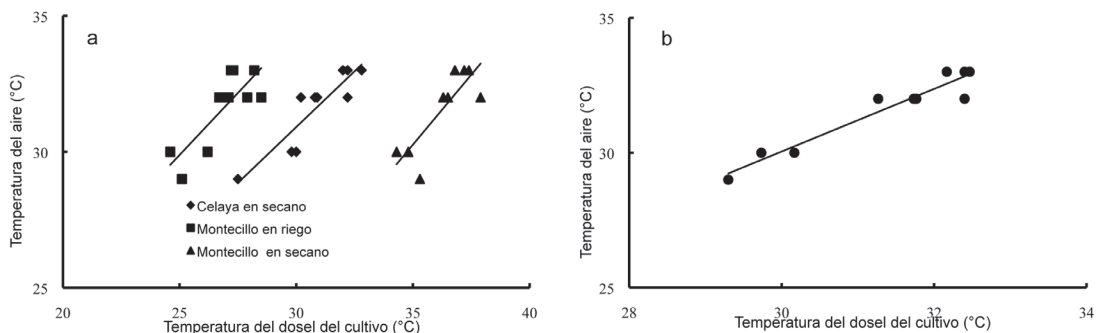


Fig. 5. Relación entre la temperatura del dosel del cultivo y la temperatura del aire determinada entre las etapas R5 (50 dds) y R6 (70 dds), para frijol tipo "Flor de Mayo" y Michoacán 128 en Celaya en seco, Montecillo en riego y Montecillo en seco (a) y en promedio (b) de los 3 ambientes de humedad del suelo. 2007.

deficiencia de humedad en el suelo, las plantas estuvieron sujetas a mayor nivel de estrés hídrico y esto disminuyó considerablemente la tasa de transpiración (Balota et al. 2007), debido a una fuerte reducción de la conductancia estomática en respuesta al cierre estomático inducido por la sequía (Reynolds et al. 2001), reflejándose en una mayor temperatura del dosel del cultivo. Michoacán 128 tuvo mayor T_c que los cultivares de tipo “Flor de Mayo”, debido a que desarrolló un mayor nivel de estrés hídrico al disminuir en mayor medida sus ψ y P , sobre todo en Montecillo en seco (Reynolds et al. 2001).

Temperatura del cultivo, relaciones hídricas y rendimiento, y sus componentes

El incremento en la T_a , particularmente en la temperatura mínima, observado en Celaya y Montecillo después de la floración, se reflejó en un aumento de la T_c en los 3 ambientes de humedad del suelo, al causar estrés por calor; éstas condiciones de estrés se agudizaron con el descenso en el contenido hídrico de las plantas en el ambiente más seco (Montecillo en seco); la T_c se relacionó negativa y significativa con el ψ y el π en Montecillo en seco ($\psi = -0,17(T_c) + 4,1$,

$r = 0,88$, $p \leq 0,01$ (Figura 6a) y $\pi = -0,15(T_c) + 3,1$, $r = 0,76$, $p \leq 0,01$) (Figura 6b); el ψ y el π no estuvieron relacionados significativamente con la T_c en Montecillo en riego y Celaya en seco. Los cultivares con ψ más altos mantuvieron el dosel del cultivo más fresco y presumiblemente, la apertura de los estomas y la tasa transpiratoria a pesar del déficit hídrico del suelo; resultados similares han sido observados en trigo en donde ψ más altos contribuyeron a mantener una menor temperatura del dosel del cultivo (Ehrler et al. 1978). La disminución en el π al aumentar la concentración de solutos, contribuyó a mantener la turgencia (P) y aquellos genotipos que tuvieron mayor capacidad de ajuste osmótico, mantuvieron mayor grado de turgencia a pesar de las condiciones de sequía en el suelo y las altas temperaturas del aire. Gaur et al. (2008) observaron que mayor densidad, profundidad y biomasa de las raíces en garbanzo también contribuyeron a disminuir la temperatura del cultivo y mantener la transpiración en condiciones de sequía. Michoacán 128 tuvo menor capacidad de ajuste osmótico que los cultivares de tipo “Flor de Mayo”, y esto se reflejó en menor nivel de turgencia y más altos niveles de estrés por alta temperatura.

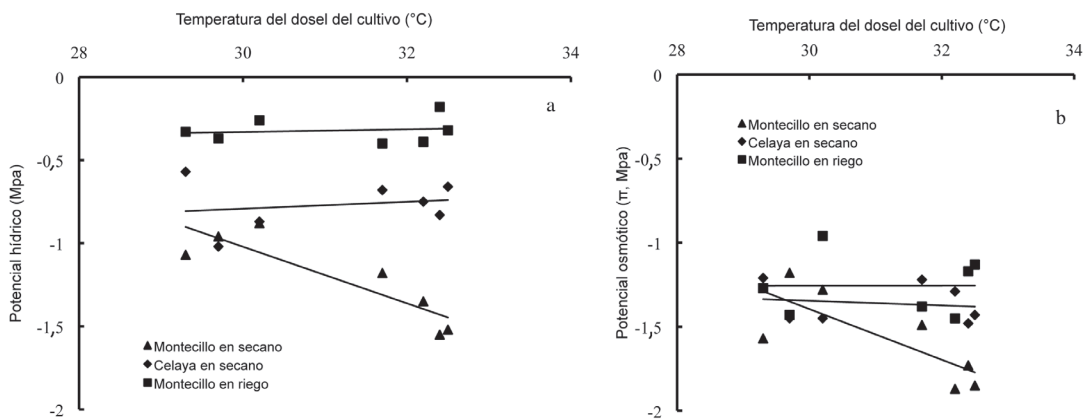


Fig. 6. Relación de la temperatura del dosel del cultivo con el potencial hídrico (a) y potencial osmótico (b), para frijol tipo “Flor de Mayo” y Michoacán 128 en Montecillo en riego, Celaya en seco y Montecillo en seco. 2007.

La alta Tc redujo significativamente la producción de biomasa aérea final y rendimiento de semilla y sus componentes; la Tc se asoció negativa y significativamente con el rendimiento de semilla [Montecillo en riego ($RS=-27,4(Tc)+1123$, $r=0,93$, $p\leq 0,01$), Celaya en secano ($RS=-33,2(Tc)+1280$, $r=0,85$, $p\leq 0,01$) y Montecillo en secano ($RS=-24,6(Tc)+937$, $r=0,86$, $p\leq 0,01$) (Figura 7a)], biomasa aérea final [Montecillo en riego ($BMAF=-51,4(Tc)+2131$, $r=0,92$, $p\leq 0,01$), Celaya en secano ($BMAF=-77,8(Tc)+2919$, $r=0,92$, $p\leq 0,01$) y Montecillo en secano ($BMAF=-55,7(Tc)+2099$, $r=0,91$, $p\leq 0,01$) (Figura 7b)]; número de vainas normales.m² [Montecillo en riego ($VN.m^2=-14,2(Tc)+695$, $r=0,63$, $p\leq 0,05$), Celaya en secano ($VN.m^2=-28(Tc)+1083$, $r=0,78$, $p\leq 0,01$) y Montecillo en secano ($VN.m^2=-35,7(Tc)+1351$, $r=0,85$, $p\leq 0,01$) (Figura 7c)] y peso de 100 semillas [Montecillo en riego ($P100S=-1,4(Tc)+68,4$, $r=0,72$, $p\leq 0,01$), Celaya en secano ($P100S=-1,4(Tc)+66,7$,

$r=0,71$, $p\leq 0,01$) y Montecillo en secano ($P100S=-1,3(Tc)+67,2$, $r=0,77$, $p\leq 0,01$) (Figura 7d)]. Se observó que los cultivares con mayor rendimiento de semilla también produjeron alta BMAF, VN.m² y P100S en los 3 ambientes de humedad del suelo (Figuras 7a a 7d). No obstante, al examinar la relación entre la Tc y RS, BMAF, VN m² y P100S en los 3 ambientes, se determinó que la alta temperatura tuvo un efecto más severo en el RS y la BMAF en Celaya en secano que en Montecillo en riego y secano, mientras que en Montecillo en secano el número VN.m² fue más afectado por la alta temperatura que en Montecillo en riego y Celaya en secano. La Tc presentó un efecto similar el P100S en los 3 ambientes de humedad del suelo (Figuras 6a a 6d). También se determinó que la alta temperatura redujo el RS, BMAF, VN.m² y P100S en 12,5, 10,7, 10,2 y 3,4% por cada °C (-1°C) de aumento en la temperatura del dosel del cultivo en promedio de todas las variedades; FM Noura, FM Anita

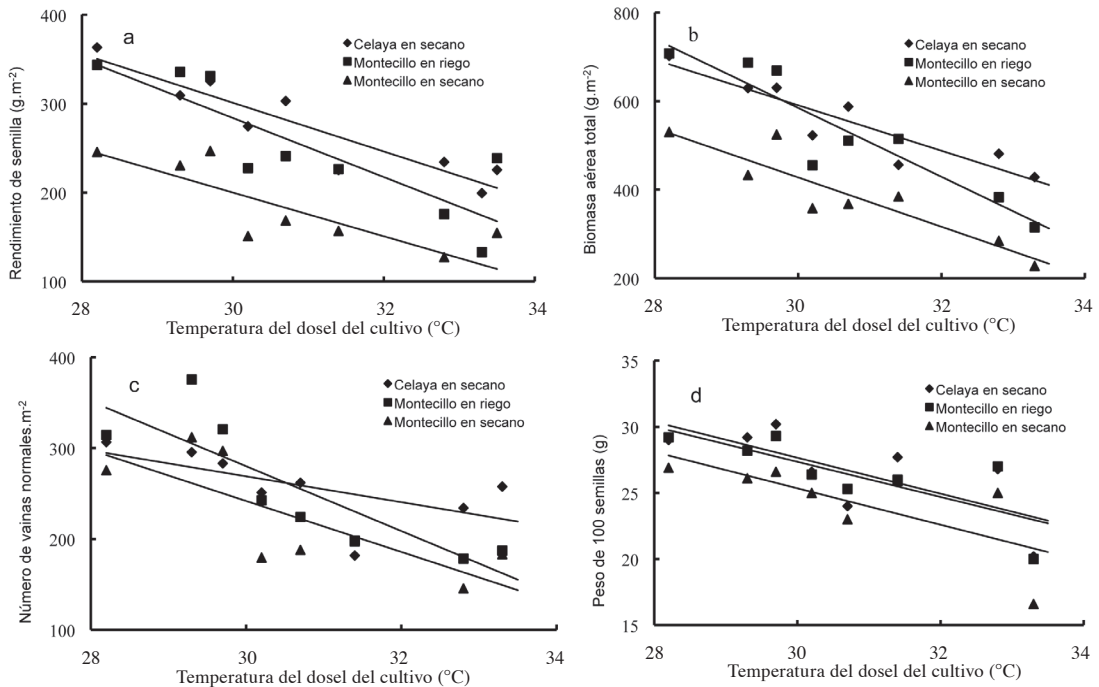


Fig. 7. Relación de la temperatura del dosel del cultivo con el rendimiento de semilla (a), biomasa aérea final (b), número de vainas.m² (c) y peso de 100 semillas (d), para frijol tipo "Flor de Mayo" y Michoacán 128. 2007.

y FM M38 fueron los cultivares que tuvieron menor reducción en el rendimiento de semilla y sus componentes por efecto del calor en los 3 ambientes (Cuadro 3). Otros trabajos de investigación con altas temperaturas (día/noche; 24/21; 27/24; 30/27 y 33/30°C), durante el desarrollo reproductivo también disminuyeron severamente el número de semillas, número de vainas normales, peso promedio de la semilla y semilla/vaina en 83, 63, 47 y 73%, respectivamente (Rainey y Griffiths 2005). Michoacán 128 tuvo mayores reducciones en RS, BMAF, VN.m² y P100S que los cultivares de tipo “Flor de Mayo”, por efecto de las temperaturas altas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron una amplia la variabilidad en la respuesta del frijol al estrés, causado por las deficiencias hídricas del suelo y las temperaturas altas del aire, factores desfavorables que

generalmente coinciden con las etapas fenológicas más sensibles de las plantas en los ambientes de secano. Esto también mostró la existencia de variabilidad genética en la capacidad de las plantas para ajustarse osmóticamente en respuesta a la sequía y la forma en que este mecanismo fisiológico, puede contribuir a mantener la turgencia para que las plantas continúen transpirando y con cúmulos de materia seca, para producir rendimiento en condiciones de sequía y altas temperaturas del aire. Con base en los resultados obtenidos, puede inferirse que la obtención de nuevos cultivares de frijol con tolerancia a sequía y calor, puede lograrse al seleccionar genotipos con alta capacidad de ajuste osmótico, alta capacidad de acumulación de biomasa y alta producción de semilla y sus componentes en ambientes con estrés hídrico y altas temperaturas.

Cuadro 3. Porcentaje de rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BMAF), número de vainas normales.m² (VN.m²) y peso de 100 semillas (P100S), calculado para cada genotipo de frijol tipo “Flor de Mayo” al dividirlo por el promedio de Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en secano. 2007.

Variedad	RS	BF	NV	P100S
		(%)		
FM Noura	136,4	133,8	124,9	109,1
FM Anita	130,4	126,5	126,1	110,3
FM M38	126,1	119,7	137,4	107,0
FM Sol	100,6	100,1	93,3	92,7
FM Bajío	92,1	91,8	93,1	100,1
FM Corregidora	87,6	90,0	80,4	105,0
FM 2000	91,1	94,0	80,9	102,1
FM RMC	75,8	78,3	77,0	101,1
Michoacán 128	59,8	65,8	87,1	72,7
Media general [†]	234,0	485,2	239,7	26,0
	(g.m ⁻²)	(g.m ⁻²)	Vainas.m ⁻²	(g)

CONCLUSIONES

La deficiencia hídrica del suelo durante la floración (entre las etapas R4 y R6) disminuyó el potencial hídrico, osmótico y de turgencia en

mayor grado en Montecillo en secano que en Celaya en secano y Montecillo en riego. La mayor disminución del potencial osmótico en Montecillo en secano, se reflejó en mayor capacidad de

ajuste osmótico; las variedades con mayor capacidad de ajuste osmótico produjeron mayor rendimiento de semilla, biomasa aérea final, número de vainas normales.m⁻² y peso de 100 semillas. La temperatura del aire se relacionó estrechamente con la temperatura del dosel del cultivo y esta aumentó, al disminuir el contenido de agua del suelo y el potencial hídrico foliar de las plantas durante la floración, al imponerse condiciones de déficit hídrico más severas en el suelo. La temperatura del cultivo se relacionó negativamente con el potencial hídrico y osmótico, sobre todo en el ambiente más seco (Montecillo en seco); los genotipos que mantuvieron más alto grado de turgencia conservaron la temperatura de su follaje más baja. La alta temperatura de la planta redujo el rendimiento de semilla, la biomasa aérea final, el número de vainas normales.m⁻² y el peso de 100 semillas en 12,5, 10,7, 10,2 y 3,4% por cada °C (-1°C) de aumento en la temperatura del dosel del cultivo en promedio de los 3 ambientes de humedad del suelo.

LITERATURA CITADA

- ACOSTA-GALLEGOS J.A., ROSALES-SERNA R., NAVARRETE-MAYA R., LÓPEZ-SALINAS E. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. *Agricultura Técnica en México* 26 (1):79-98.
- AMEDE T., SCHUBERT S. 2003. Mechanisms of drought resistance in grain legumes. I. Osmotic adjustment. *Ethiopian Journal of Science* 26 (1):37-46.
- BABU R.C., PATHAM M.S., BLUM A., NGUYEN H.T. 1999. Comparison of measurement methods of osmotic adjustment in rice cultivars. *Crop Science* 39:150-158.
- BALOTA M., PAYNE W.A., EVETT S.E., LAZAR M.D. 2007. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat. *Crop Science* 47:1518-1529.
- BARRIOS-GÓMEZ E.J., LÓPEZ-CASTAÑEDA C. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia* 43:29-35.
- BASNAYAKE J.A., COOPER M., HENZELL G., LUDLOW M.M. 1996. Influence of the rate of development of water deficit on the expression of maximum osmotic adjustment and desiccation tolerance in three grain sorghum lines. *Field Crops Research* 49:65-76.
- BEGG J.E., TURNER N.C. 1976. Crop water deficits. *Advances in Agronomy* 28:161-217.
- BERRY J., BJÖRKMAN O. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 31:491-543.
- BOOTE K.J., ALLEN L.H., PRASAD P.V.V., BAKER J.T., GESCH R.W., SNYDER A.M., PAN D., THOMAS J.M.G. 2005. Elevated temperature and CO₂ impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. *Journal of Agricultural Meteorology Japan* 60:469-474.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT).1982. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Cali, Colombia. 26 p.
- EHRLER W.L., IDSO S.B., JACKSON R.D., REGINATO R.J. 1978. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal* 70:251-256.
- GAN Y., ANGADI S.V., CUTFORTH H.W., POTTS D., ANDAGI V.V., McDONALD C.L. 2004. Canola and mustard response to short periods of high temperature and water stress at different developmental stages. *Canadian Journal of Plant Science* 84:697-704.
- GAUR P.M., KRISHNAMURTHY L., KASHIWAGI J. 2008. Improving drought-avoidance root traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) – Current status of research at ICRISAT. *Plant Production Science* 11 (1):3-11.
- HALL A.E. 2004. Breeding for adaptation to drought and heat in cowpea. *European Journal of Agronomy* 21:447-454.
- HALTERLEIN A.J. 1983. Bean. *Crop-Water Relations*, pp. 157-186. In: I.D. Teare and M.M. Peet (eds.). John Wiley Publications. New York.
- JONES M., RAWSON H. 1979. Influence of rate of development on leaf water deficits upon photosynthesis, leaf conductance, water use efficiency, and osmotic potential in sorghum. *Physiologia Plantarum* 45 (1):103-111.
- KUMAR A., OMAE H., EGAWA Y., KASHIWABA K., SHONO M. 2006. Adaptation to heat and drought stresses in snap bean (*Phaseolus vulgaris*) during the reproductive stage of development. *Japan Agricultural Research Quarterly* 40(3):213-216.

- LEPORT L., TURNER N.C., DAVIES S.L., SIDDIQUE K.H.M. 2006. Variation in pod production and abortion among chickpea cultivars under terminal drought. *European Journal of Agronomy* 24:236-246.
- MARTÍNEZ J.P., SILVA H., LEDENT J.F., PINTO M. 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26:30-38.
- MORGAN J.M., CONDON A.G. 1986. Water use, grain yield, and osmoregulation in wheat. *Australian Journal Plant Physiology* 13 (4):523-532.
- MORGAN J.M., RODRÍGUEZ-MARIBONA B., KNIGHTS E.J. 1991. Adaptation to water-deficit in chickpea breeding lines by osmoregulation: relationship to grain yields in the field. *Field Crops Research* 27:61-70.
- NAYYAR H., KAUR S., SMITA, SINGH K.J., DHIR K.K., BAINS T. 2005. Water stress-induced injury to reproductive phase in chickpea: evaluation of stress sensitivity in wild and cultivated species in relation to abscisic acid and polyamines. *Journal of Agronomy and Crop Science* 191:450-457.
- NAYYAR H., WALIA D.P. 2004. Genotypic variation in wheat in response to water stress and abscisic acid induced accumulation of osmolytes in developing grains. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190:39-45.
- PARSONS L.R., HOWE T.K. 1984. Effects of water stress on the water relations of *Phaseolus vulgaris* and the drought resistant *Phaseolus acutifolius*. *Physiologia Plantarum* 60(2):197-202.
- RAINEY K.M., GRIFFITHS P.D. 2005. Differential response of common bean genotypes to high temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130 (1):18-23.
- REYNOLDS M.P., NAGARAJAN S., RAZZAQUE M.A., AGEEB O.A.A. 2001. Heat tolerance. Application of physiology in wheat breeding, pp. 124-135. In: M.P. Reynolds, J.I. Ortíz-Monasterio, A. McNab (eds.). México, D. F. CIMMYT.
- ROSALES S.R., ACOSTA G.J.A., MURUAGA M.J.S., HERNÁNDEZ C.J.M., ESQUIVEL E.G., PÉREZ H.P. 2004. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Libro técnico N°. 6). SAGARPA, INIFAP, CIRCE, Campo Experimental Valle de México. Chapingo. México. México. 148 p.
- SAS (Statistical Analysis System), Versión 8 para Windows. 2007. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- SILVA-ROBLEDO H., ORTIZ-LIZANA M., ACEVEDO-HINOJOSA E. 2007. Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia* 41:23-34.
- SINGH S.P. 2005. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement. Volumen 1, Grain Legumes, pp. 11-48. In: R.J. Singh and P.P. Jauhar (eds.). Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, U.S.A.
- STOYANOV Z.Z. 2005. Effects of water stress on leaf water relations of young bean plants. *Journal of Central European Agriculture* 6(1):5-14.
- SUBBARAO G.V., NAM N.H., CHAUHAN Y.S., JOHANSEN C. 2000. Osmotic adjustment, water relations and carbohydrate remobilization in pigeon pea under water deficits. *Journal of Plant Physiology* 157:651-659.
- TURNER N.C. 1986. Crop water deficits: A decade of progress. *Advances in Agronomy* 39:1-51.
- WHITE J.W., IZQUIERDO J. 1991. Physiology of yield potential and stress tolerance. Common beans: Research for crop improvement, pp. 287-382. In: A. van Schoonhoven, O. Voysest (eds.), C.A.B. International, U.K. and CIAT, Cali, Colombia.

