

Cambios en el rendimiento y sus componentes en frijol bajo riego y sequía

Celia Selene Romero- Félix^{1§}
Cándido López- Castañeda¹
Josué Kohashi- Shibata¹
Salvador Miranda-Colín¹
Víctor Heber Aguilar-Rincon¹
Carlos Gustavo Martínez-Rueda²

¹Colegio de Postgraduados-*Campus* Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. Tel. 01 (595) 9520200, ext. 1587. (clc@colpos.mx; jkohashi@colpos.mx; smiranda@colpos.mx; aheber@colpos.mx). ²Facultad de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. CP. 50090. (cgmartinezr@uaemex).

§Autor para correspondencia: celiaromero82@hotmail.com.

Resumen

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) se ve afectado por la sequía, la cual al presentarse durante la etapa reproductiva puede afectar considerablemente sus componentes morfológicos y fisiológicos. El objetivo de este estudio fue evaluar la variabilidad genética en el rendimiento de semilla y sus componentes y fenología de la planta en tiempo térmico (°Cd) en variedades de frijol ‘Flor de Mayo’ y de frijol negro del sur de Veracruz, en riego y sequía bajo una cubierta plástica, en el Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo en primavera-verano 2014. En riego, las variedades FM M38, FM Sol y FM RMC sobresalieron por presentar mayor rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea (BMA), índice de cosecha (IC), grados día a floración (GDF) y grados día a madurez fisiológica (GDMF), mientras que en sequía, FM M38 y FM Sol tuvieron altos valores en RS, BMA, GDF y GDMF. La sequía disminuyó el RS (42.1%), BMA (31.7%), IC (13.4%), número de vainas por planta (VP; 36.5%), semillas por planta (SP; 43.9%), semillas por vaina (SV; 10.3%) y peso individual de semilla (PIS; 16.2%) con respecto a riego. El RS de las variedades ‘Flor de Mayo’ y de frijoles negros, en condiciones de riego se relacionó positiva y significativamente con la BMA, el IC y el PIS. Bajo sequía, el RS se relacionó positiva y significativamente con la BMA y con el IC.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., biomasa, madurez fisiológica, niveles de humedad.

Recibido: diciembre de 2018

Aceptado: enero de 2019

Introducción

La sequía es el principal factor limitante del rendimiento de grano (RG) de los cultivos en ambientes de secano, tal es el caso del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) donde los efectos del déficit hídrico en la planta dependen de la variedad, etapa fenológica, duración y severidad del estrés (López *et al.*, 1996; Assefa *et al.*, 2013). El RG se relaciona positivamente con la biomasa acumulada (Escalante, 1999; Apáez *et al.*, 2011). Algunos autores señalan que altos RG en los cultivos son resultado de una mayor producción de materia seca en las hojas y del incremento en la acumulación de carbono (Geiger *et al.*, 1989), en frijol una alta biomasa aérea está asociada con mayor producción de fotoasimilados que se translocan a vainas y semillas mejorando el RG (Ramírez y Kelly, 1998; Romero *et al.*, 2015).

Por otro lado, el RG bajo condiciones de déficit hídrico disminuye por la reducción en algunos de sus componentes, López *et al.* (1996) y Assefa *et al.* (2013) indican que el número de vainas y semillas por planta pueden reducir el rendimiento de semilla hasta 70% dependiendo de la duración e intensidad del periodo de estrés. Nuñez *et al.* (2005) al estudiar la respuesta de la variedad de frijol Seafarer bajo condiciones de riego y sequía a partir del inicio de floración, determinaron que el rendimiento de semilla, índice de cosecha, número de vainas por planta, semillas por vaina y peso individual de semilla en sequía disminuyeron 80, 26, 63, 29 y 22%, comparados con riego. Acosta *et al.* (1997) mencionan que la reducción del rendimiento estuvo ligada a la disminución del número de vainas y semillas por planta y en menor grado al número de semillas por vaina y al peso de 100 semillas.

El estrés hídrico tiene su efecto más adverso durante la fase reproductiva (Costa *et al.*, 2000). Diversos estudios muestran que se reduce el número de flores, vainas y semillas por vaina (Xia, 1997), en algunas variedades de frijol la sequía disminuye hasta 47% el número de flores, afectando el número de vainas por planta (Nuñez *et al.*, 2005). También se ha observado que el aborto de vainas bajo condiciones de estrés hídrico puede variar de 21 a 65% (Mwanamwenge *et al.*, 1999).

En evaluaciones de campo para selección por tolerancia a sequía, el contenido de humedad edáfica suele ser un factor difícil de controlar debido a la variabilidad natural en la profundidad y perfil de retención de humedad del suelo y a la ocurrencia de lluvias cuando se desean condiciones de estrés por sequía. Para estudiar la respuesta fenotípica ante el déficit hídrico del suelo, los fitomejoradores generan contextos de validación bajo condiciones controladas que les permitan discriminar con mayor precisión a los genotipos más tolerantes a este factor adverso e identificar atributos morfológicos y fisiológicos asociados con la tolerancia a este tipo de estrés.

En la presente investigación, se evaluaron 12 variedades mexicanas de frijol común bajo condiciones controladas de riego y sequía, con el objetivo conocer su tolerancia al estrés hídrico edáfico, así como estudiar los cambios en los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de semilla cuando el cultivo se somete a condiciones de sequía.

Materiales y métodos

Sitio experimental

Este trabajo se llevó a cabo en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México (19° 21' latitud norte, 98° 55' longitud oeste y 2 250 msnm), en el ciclo primavera-verano 2014 en condiciones de riego y sequía en contenedores de PVC. Se utilizó un suelo franco-arenoso (63% arena, 27% limo y 9.8% arcilla), con capacidad de campo (CC) de 41.6% y porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) de 28.2%.

Material genético

Se usaron ocho variedades comerciales de frijol del tipo 'Flor de Mayo' (FM Anita, FM Corregidora, FM 2000, FM M38, FM Sol, FM Bajío, FM Noura y FM RMC), dos variedades con testa de semilla color negro (Negro Cotaxtla 91 y Negro Veracruz) y dos variedades criollas: Michoacán 128 (similar a las variedades tipo 'Flor de Mayo') y Criollo San Andrés (con testa de semilla color negro).

Diseño experimental y tratamientos de humedad edáfica

Las doce variedades se evaluaron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en condiciones de riego (R) y en sequía (S), la unidad experimental consistió en una planta por cada contenedor o tubo de PVC de 1 m de alto y 10 cm de diámetro. En cada contenedor se introdujo una bolsa de plástico cilíndrica de las mismas dimensiones del tubo, se llenó con suelo previamente desinfectado con Furadan® (Carbofuran) y Quatz IV® (Sulfosuccinato) a dosis de 1 ml por contenedor. El suelo se llevó a CC y se determinó su peso inicial (PICC). La siembra se hizo el 12 de abril de 2014. Se fertilizó con 40 kg N ha⁻¹ y 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ en la siembra y 40 kg N ha⁻¹ a los 35 días después de la siembra (dds).

En el tratamiento de R se pesaron los contenedores cada tercer día, para calcular la cantidad de agua evapotranspirada (E_T) y agregar el agua requerida para llevar el suelo de cada contenedor al PICC y mantener el nivel de humedad cercano a CC desde la siembra hasta la madurez fisiológica de las plantas.

En el tratamiento de S se procedió de igual manera que en R. Sin embargo, a los 45 dds (cerca de la etapa de inicio de floración) se suspendió la aplicación de agua y sólo se registró el peso de los contenedores hasta la madurez fisiológica. Las plantas se mantuvieron debajo de una cubierta de polietileno transparente a una altura de 2.5 m para evitar la caída de agua de lluvia durante el experimento y permitir que las plantas estuvieran expuestas a la temperatura ambiental. Para el control de mosquita blanca se aplicó Nugor® (Dimetoato) a una dosis de 1 L ha⁻¹ a los 23 y 30 dds.

Variables medidas

Grados día de crecimiento para alcanzar la floración (GDF, °Cd)

La floración se determinó cuando cada planta individual mostró una o más flores abiertas.

Grados día de crecimiento para alcanzar la madurez fisiológica (GDMF, °Cd)

La madurez fisiológica se determinó cuando 90% de las vainas en cada planta individual presentaron un color paja.

Los grados día (GD, °Cd) a floración y madurez fisiológica se calcularon con la siguiente ecuación.

$$GD = \sum_{i=0}^n (X_i - T_b)$$

Donde: GD= grados día (°Cd), X_i = media de la temperatura máxima y mínima diaria del aire y T_b = temperatura base con valor de 8.2 °C para frijol (Barrios y López, 2009).

Vainas por planta (VP)

Se contó el número total de vainas que contenían al menos una semilla normal con el tamaño y color característico de cada genotipo.

Semillas por planta (SP)

Se contó el número total de semillas en cada unidad experimental.

Semillas por vaina (SV)

Se contó el número de semillas producidas en cada una de las vainas normales de cada planta individual.

Peso individual de semilla (PIS, mg)

Se determinó como el cociente entre el rendimiento de semilla por planta y el número de semillas por planta.

Rendimiento de semilla por planta (RS, g)

Se determinó al pesar todas las semillas normales producidas por la planta.

Biomasa aérea (BMA, g)

Se registró el peso de la materia seca de la planta en la madurez fisiológica; se incluyó el peso de todos los órganos vegetativos (peciolos, folíolos y ramas) y reproductivos (botones, flores y vainas) que sufrieron abscisión, los cuales fueron colectados durante el ciclo biológico de las plantas.

Índice de cosecha (IC)

Se calculó al dividir el RS entre la BMA [IC= (RS/BMA)*100].

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (Andeva) bajo un diseño experimental en bloques al azar con dos factores (variedades y niveles de humedad) y un Andeva individual para riego y sequía. Para la comparación de medias se utilizó la diferencia mínima significativa (DMS, $p \leq 0.05$). Se utilizó el programa SAS (SAS, 2014) versión 9.4 para Windows.

Resultados

Datos meteorológicos

Se registraron las temperaturas máxima y mínima del aire con un termómetro de columna de mercurio de máxima y mínima, marca Taylor®. Las temperaturas máxima y mínima promedio durante el ciclo de las plantas fueron 33 y 11 °C, respectivamente; la máxima varió entre 25 y 40 °C durante la mayor parte del ciclo biológico, con una tendencia a disminuir hacia la madurez fisiológica, mientras que la mínima varió entre 7 y 13 °C, con una tendencia a aumentar después de la floración (Figura 1).

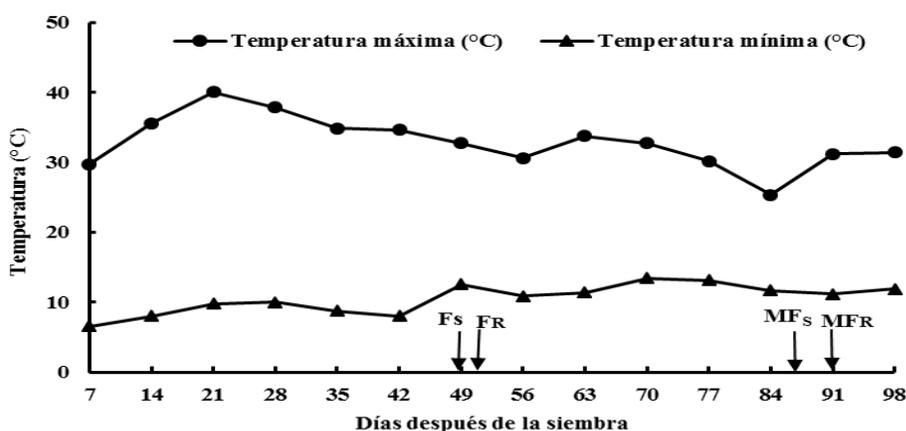


Figura 1. Temperatura máxima y mínima del aire promedio semanal. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Fs= número de días a floración en sequía; FR= número de días a floración en riego; MFR= número de días a madurez fisiológica en riego; MFs= número de días a madurez fisiológica en sequía.

Contenido de humedad edáfica

El tratamiento de riego se mantuvo cerca de CC (41.6%) desde la siembra hasta la madurez fisiológica sin que las plantas experimentaran estrés hídrico. En sequía la aplicación de agua se suspendió a los 45 dds. El contenido hídrico del suelo disminuyó durante el ciclo biológico de las plantas hasta alcanzar un nivel inferior al PMP (28.2%) durante el periodo de formación de la semilla y la etapa de madurez fisiológica (Figura 2).

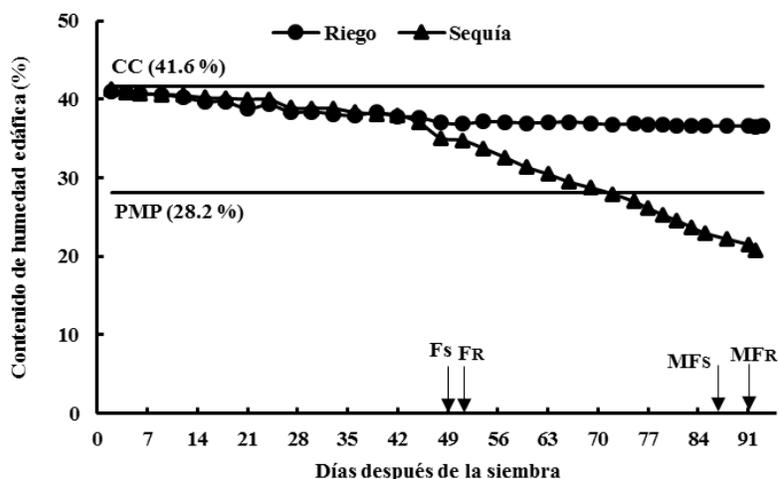


Figura 2. Contenido de humedad edáfica en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CC= capacidad de campo; PMP= porcentaje de marchitamiento permanente; Fs= número de días a floración en sequía; FR= número de días a floración en riego; MFR= número de días a madurez fisiológica en riego; MFs= número de días a madurez fisiológica en sequía. Cada punto representa la media general de todos los genotipos para cada nivel de humedad.

Riego

El análisis de varianza (Andeva) individual para las condiciones de riego detectó diferencias estadísticas significativas entre variedades para el RS ($F= 6.7, p < 0.0001$), BMA ($F= 9.4, p < 0.0001$), IC ($F= 3.6, p = 0.0134$), VP ($F= 22.3, p < 0.0001$), SP ($F= 6.7, p = 0.0013$), SV ($F= 6.9, p = 0.0085$), PIS ($F= 11, p < 0.0001$), GDF ($F= 9.2, p < 0.0001$) y GDMF ($F= 13.5, p < 0.0001$), las variedades FM M38, FM Sol y FM RMC tuvieron mayor RS, BMA, IC, GDF y GDMF; asimismo, la variedad FM M38 mostró alto número de SP y SV, FM Sol tuvo alto número de VP y PIS y FM RMC presentó alto PIS. Adicionalmente, las variedades FM Anita, FM Noura, FM 2000, Negro Veracruz, Michoacán 128 y FM Bajío, presentaron mayores valores en IC, IC y PIS, PIS, IC, VP e IC, respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rendimiento de semilla y sus componentes y fenología de la planta bajo riego. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Variedades	RS	BMA	IC	VP	SP	SV	PIS	GDF	GDMF
FM M38	18.5	33.2	57.5	11	76.5	6	340	707 (52)	1282 (95)
FM Sol	18.6	35.2	53	17	55.5	3.5	450	716 (53)	1259 (94)
FM RMC	16.5	31.9	51.3	10.7	41	3.5	405	722 (53)	1272 (95)
FM Anita	14.5	26.7	52.5	16.5	59	4	306.7	666 (48)	1168 (86)
FM Noura	13.4	25.7	56	7.5	30.5	4	420	700 (51)	1237 (92)
FM 2000	12.5	27.9	44.3	11	31	2	460	670 (49)	1223 (91)
FM Bajío	11.2	22.1	50.6	14.7	43	3	263.3	661 (48)	1156 (85)
FM Corregidora	11.2	23	47	8.5	41	5	350	683 (50)	1219 (90)
Negro Veracruz	13.5	25.9	53.5	10	46.3	4.5	290	680 (49)	1251 (93)

Variedades	RS	BMA	IC	VP	SP	SV	PIS	GDF	GDMF
Negro Cotaxtla 91	9.6	21.9	40	12.5	57.5	4.5	185	700 (51)	1218 (90)
Criollo San Andrés	9.6	22.5	42.3	13	57	4.5	190	688 (50)	1237 (92)
Michoacán 128	12.1	24.9	46	19	57	3	235	683 (50)	1223 (91)
Media general	13.3	26.5	49.2	12.6	49.2	3.8	325.9	689 (50)	1228 (91)
DMS ($p \leq 0.05$)	3.4	4.1	8.9	2.2	15.3	1.3	83.3	19 (2)	30 (2)

RS= rendimiento de semilla (g); BMA= biomasa aérea (g); IC= índice de cosecha (%); VP= vainas por planta; SP= semillas por planta; SV= semillas por vaina (g); PIS= peso individual de semilla; GDF= grados día a floración; GDMF= grados día a madurez fisiológica; DMS= diferencia mínima significativa.

Sequía

El Andeva individual mostró diferencias estadísticas significativas entre variedades para el RS ($F=3.9$, $p=0.0032$), BMA ($F=7.1$, $p<0.0001$), IC ($F=23.5$, $p<0.0001$), VP ($F=9.7$, $p<0.0001$), SP ($F=10.8$, $p<0.0001$), SV ($F=8.2$, $p=0.0012$), PIS ($F=11.3$, $p=0.0001$), GDF ($F=6.3$, $p<0.0001$) y GDMF ($F=7.7$, $p<0.0001$), las variedades FM M38 y FM Sol tuvieron altos valores en RS, BMA, GDF Y GDMF; además, FM M38 tuvo alto IC y número de SV, las variedades FM RMC, FM Anita, FM 2000, Negro Veracruz, Michoacán 128, FM Bajío, Negro Cotaxtla 91 y Criollo San Andrés mostraron altos valores medios en BMA, SV, GDF Y GDMF, VP, PIS, SV, BMA, VP, SP, SV y GDF, IC, VP y SP, SP, SV, GDF y GDMF y VP, SP y SV, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento de semilla y sus componentes y fenología de la planta bajo sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Variedades	RS	BMA	IC	VP	SP	SV	PIS	GDF	GDMF
FM M38	10.1	19.8	51.5	7	31	4	245	707 (52)	1233 (91)
FM Sol	10.3	21.5	48	7.6	22.7	3	350	688 (50)	1206 (89)
FM RMC	6.6	20.9	33	6.5	23	4	283.3	707 (52)	1240 (92)
FM Anita	7.9	17.9	47	11	27	2.5	275	652 (47)	1163 (86)
FM Noura	7.6	18.3	39	6	23.7	3.5	323.3	700 (51)	1235 (92)
FM 2000	7.7	15.6	44.5	7	15.5	2	435	642 (46)	1176 (87)
FM Bajío	7.9	16.7	53	11.5	35.5	3	260	647 (47)	1128 (83)
FM Corregidora	7.8	18.4	39	7.3	23	3.3	285	680 (49)	1160 (86)
Negro Veracruz	6.4	17.5	39.5	6.3	23.5	4	240	666 (48)	1160 (86)
Negro Cotaxtla 91	6.8	17.4	41	7	38	5	175	683 (50)	1210 (90)
Criollo San Andrés	5.9	13.3	44.3	10.5	39.5	4	150	661 (48)	1177 (87)
Michoacán 128	7.6	19.5	35.5	10.5	37.5	4	225	683 (50)	1132(83)
Media general	7.7	18.1	42.6	8	27.6	3.5	273.1	676 (49)	1185 (88)
DMS ($p \leq 0.05$)	1.9	2.5	3.8	1.9	6.8	1	68.7	26 (2)	41 (3)

RS= rendimiento de semilla (g); BMA= biomasa aérea (g); IC= índice de cosecha (%); VP= vainas por planta; SP= semillas por planta; SV= semillas por vaina (g); PIS= peso individual de semilla (mg); GDF= grados día a floración; GDMF= grados día a madurez fisiológica; DMS= diferencia mínima significativa.

Riego vs sequía

El Andeva combinado mostró diferencias estadísticas significativas entre las medias generales de riego y sequía para el RS ($F= 231.2, p < 0.0001$), BMA ($F= 331.6, p < 0.0001$), IC ($F= 38.4, p < 0.0001$), VP ($F= 276.1, p < 0.0001$), SP ($F= 203, p < 0.0001$), SV ($F= 6.1, p= 0.0234$), PIS ($F= 30, p < 0.0001$), GDF ($F= 16.8, p= 0.0002$) y GDMF ($F= 69.9, p < 0.0001$). La sequía redujo el RS, BMA, IC, VP, SP, SV y PIS 42.1, 31.7, 13.4, 36.5, 43.9, 10.3 y 16.2% con respecto a riego; la sequía también disminuyó los grados día y días después de la siembra para alcanzar la floración y madurez fisiológica 13 (1 dds) y 43 grados (3 dds), respectivamente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Rendimiento de semilla y sus componentes y fenología de la planta en promedio de variedades para riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Niveles de humedad	RS	BMA	IC	VP	SP	SV	PIS	GDF	GDMF
Riego	13.3	26.5	49.2	12.6	49.2	3.9	325.9	689 (50)	1228 (91)
Sequía	7.7	18.1	42.6	8	27.6	3.5	273.1	676 (49)	1185 (88)
DMS ($p \leq 0.05$)	0.7	1	2.2	0.5	2.9	0.2	20.6	6 (0.5)	10 (0.8)

RS= rendimiento de semilla (g); BMA= biomasa aérea (g); IC= índice de cosecha (%); VP= vainas por planta; SP= semillas por planta; SV= semillas por vaina (g); PIS= peso individual de semilla; GDF= grados día a floración; GDMF= grados día a madurez fisiológica; DMS= diferencia mínima significativa.

Interacción variedades x niveles de humedad del suelo

El ANDEVA combinado mostró efectos significativos en la interacción variedades x niveles de humedad para el rendimiento de semilla y fenología de la planta; RS ($F= 3.2; p= 0.0025$), BMA ($F= 4, p= 0.0004$), IC ($F=4.2, p= 0.0012$), VP ($F=7.5, p < 0.0001$), SP ($F=4.3, p= 0.0007$), SV ($F= 3, p= 0.0169$) y GDMF ($F= 2.8; p= 0.007$). No se detectaron efectos significativos para el PIS ($p > 0.05$) y GDF ($F= 0.9, p > 0.487$).

Las variedades FM M38, FM Sol, FM RMC, FM Anita y Negro Veracruz (Figura 3a), FM M38, FM Sol, FM 2000 y FM RMC (Figura 3b), FM RMC y FM Noura (Figura 3c), Michoacán 128, FM Sol, FM Anita y FM 2000 (Figura 3d), FM M38, FM Sol, FM Anita, Negro Veracruz, FM 2000, Michoacán 128, Negro Cotaxtla 91, FM Corregidora, FM RMC y Criollo San Andrés (Figura 3e) y FM M38, FM Anita y FM Corregidora (Figura 3f) mostraron mayor reducción del RS, BMA, IC, VP, SP y SV en sequía con respecto a riego.

Las variedades Michoacán 128, Negro Veracruz, Criollo San Andrés, FM Corregidora y FM Sol acumularon mayor cantidad de GDMF que las otras variedades estudiadas al pasar de riego a sequía.

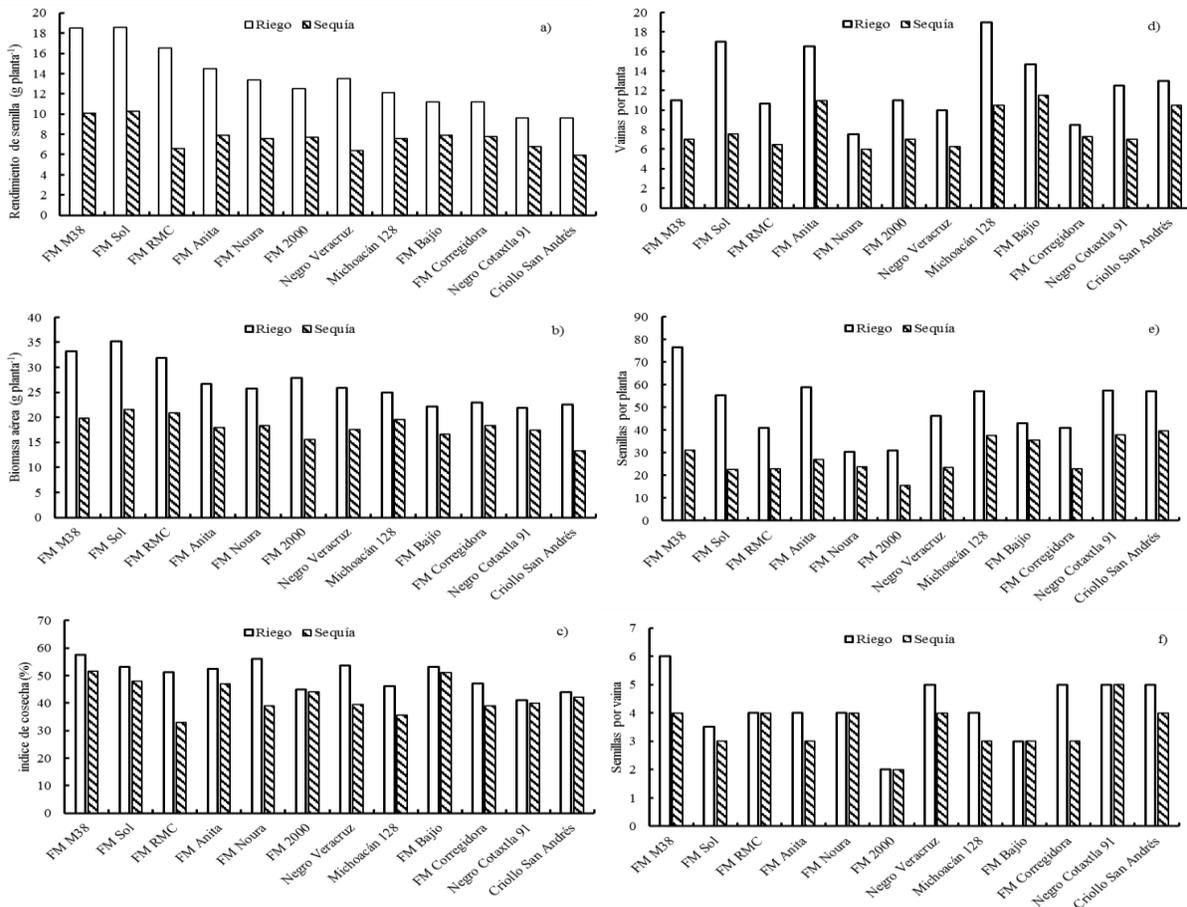


Figura 3. Interacción variedades x niveles de humedad del suelo para rendimiento de semilla. a) biomasa aérea; b) índice de cosecha; c) número de vainas por planta; d) semillas por planta; e) semillas por vaina; y f). Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Relación entre el rendimiento de semilla y sus componentes

El RS en las variedades del tipo ‘Flor de Mayo’ y negros del sur de Veracruz en condiciones de riego y sequía tuvo estrecha relación con algunos de sus principales componentes fisiológicos y numéricos, en condiciones de riego, ambos tipos de frijol tuvieron el más alto rendimiento y componentes del rendimiento con respecto a sequía; en riego, el RS se relacionó positiva y significativamente con la BMA ($RS= 0.66$ (BMA) -4.18 , $r= 0.96$, $p\leq 0.01$ (Figura 4a), así como también tuvo una relación positiva y significativa en sequía ($RS= 0.34$ (BMA) $+ 1.49$, $r= 0.58$, $p\leq 0.02$, Figura 4a), el RS se relacionó positiva y significativamente con el IC en riego y sequía, bajo riego el $RS= 0.43$ (IC) $- 7.81$, $r= 0.77$, $p\leq 0.005$ (Figura 4b), en sequía, $RS= 0.12$ (IC) $+ 2.42$, $r= 0.57$, $p\leq 0.02$ (Figura 4b), en riego el RS también se relacionó positiva y significativamente con el PIS, $RS= 0.02$ (PIS) $+ 6.80$, $r= 0.64$, $p\leq 0.01$ (Figura 4c), mientras que en sequía, la relación fue positiva pero no significativa [$RS= 0.01$ (PIS) $+ 5.71$, $r= 0.42$, $p> 0.05$ (Figura 4c)], por otro lado, la BMA en riego, se relacionó positiva y significativamente con el IC [$BMA=0.48$ (IC) $+ 2.92$, $r= 0.59$, $p\leq 0.02$ (Figura 4d), aunque en sequía, esta relación fue positiva pero no significativa [$BMA= - 0.07$ (IC) $+ 21.16$, $r=0.19$, $p> 0.05$] (Figura 4d), en riego, PIS mostró una relación negativa y no

significativa con el número de SP, [PIS= -3.37 (SP) + 491.70, $r= 0.46$, $p> 0.05$] (Figura 4e), mientras que en sequía, esta relación fue negativa y significativa [PIS=-8.53 (SP) + 512.26, $r= 0.87$, $p< 0.01$] (Figura 4e) y por último, en riego el PIS tuvo una relación negativa y no significativa con el SV, [PIS= -26.25 (SV) + 428.49, $r= 0.29$, $p> 0.05$] (Figura 4f) y en sequía, esta relación fue negativa y significativa [PIS= -73.67 (SV) + 530.24, $r= 0.79$, $p< 0.01$] (Figura 4f).

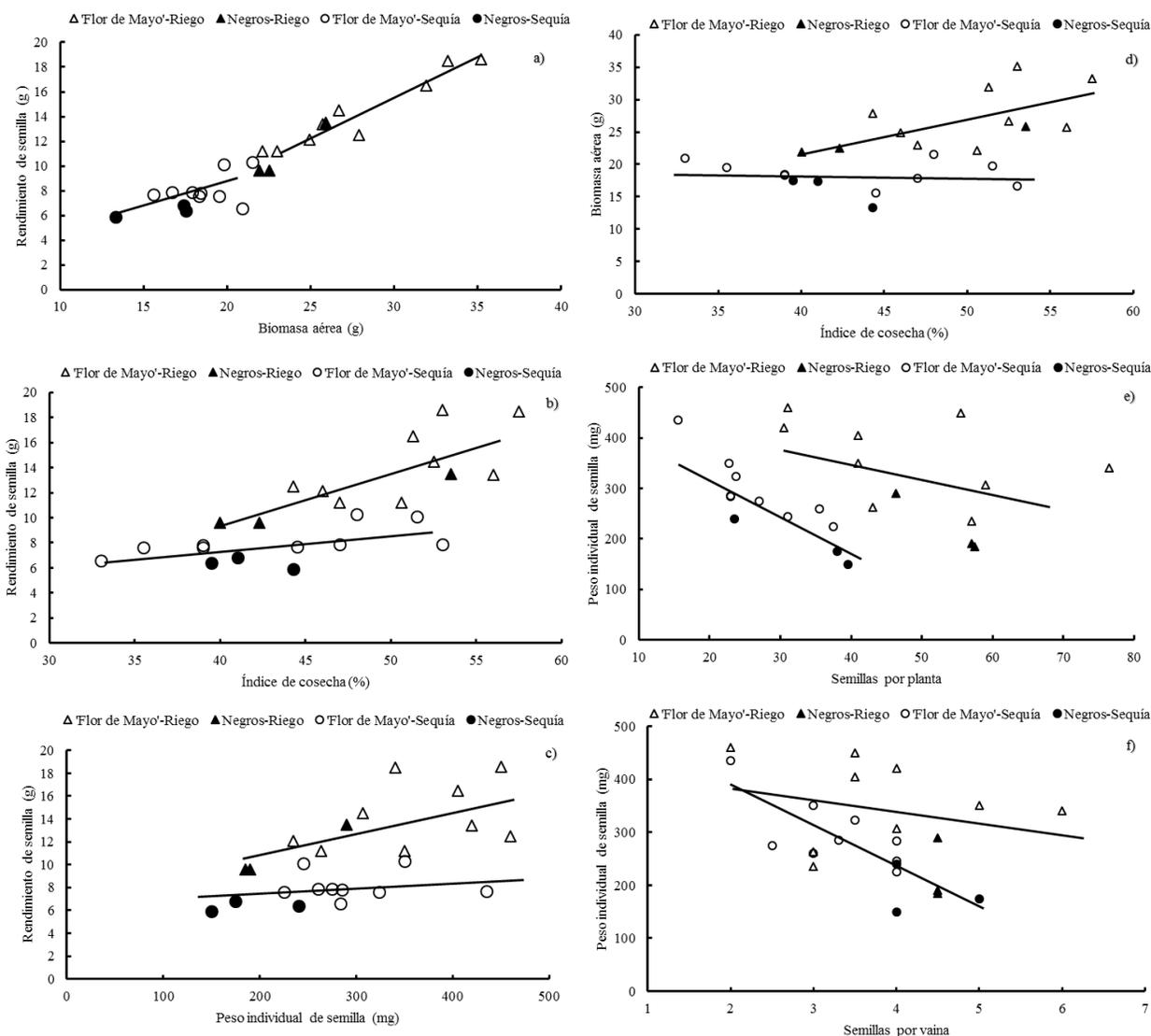


Figura 4. Relación entre el rendimiento de semilla y biomasa aérea, a) rendimiento de semilla e índice de cosecha; b) rendimiento de semilla y peso individual de semilla; c) biomasa aérea e índice de cosecha; d) peso individual de semilla y número de semillas por planta; e) peso individual de semilla y número de semillas por vaina; y f) para variedades del tipo ‘Flor de Mayo’ y negros del sur de Veracruz en riego y sequía. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Las variedades del tipo ‘Flor de Mayo’ tuvieron el más alto RS comparadas con las variedades con semilla de color negro, tanto en riego como en sequía, excepto la variedad Negro Veracruz que tuvo alto rendimiento debido a su mayor BMA y alto PIS en ambos niveles de humedad.

Discusión

Temperatura y contenido hídrico edáfico

Se presentó amplia variación en la temperatura máxima (25-40 °C) y mínima (7-13 °C) durante el experimento; la temperatura mínima en la etapa de emergencia de las plántulas fue inferior a la temperatura base (8.2 °C) (Barrios y López, 2009) y tendió a incrementarse hacia el final del ciclo del cultivo. La temperatura máxima fue mayor que la temperatura óptima para el desarrollo del frijol común (24 °C) y al inicio del ciclo del cultivo alcanzó valores de 34.1 °C, a la cual la tasa de crecimiento es cero (Ferreira *et al.*, 1997), manteniéndose cercana a 31 °C entre antesis y madurez fisiológica.

El contenido de humedad del suelo en el tratamiento de sequía fue similar al del tratamiento de riego hasta la etapa de inicio de floración, posteriormente, en el tratamiento de sequía la humedad edáfica fue disminuyendo hasta niveles inferiores al punto de marchitamiento permanente, coincidiendo esta disminución con la etapa reproductiva, etapa considerada como la más sensible a la sequía en frijol (Acosta y Kohashi, 1989; Martínez *et al.*, 2007).

Riego

El rendimiento promedio de semilla de todas las variedades en riego fue similar al rendimiento obtenido en frijol 'Flor de Junio' en riego en invernadero en Cieneguillas, Zacatecas, México (Acosta *et al.*, 2007) y en invernadero con riego en Montecillo, Texcoco, Estado de México (Castañeda *et al.*, 2009). El número de VP y SP obtenidas en el presente trabajo fueron 69 y 71% mayores a las obtenidas por Castañeda *et al.* (2009), estas diferencias entre el número de VP y SP se deben al hábito de crecimiento, las variedades incluidas en este trabajo son de hábito indeterminado, mientras el cultivar 'Otomí' tiene hábito de crecimiento determinado (Castañeda *et al.*, 2009). El IC promedio de todos los genotipos en riego fue similar al IC promedio de seis variedades de frijol de diferente hábito de crecimiento y contrastantes en su respuesta a la sequía, bajo riego en invernadero, en Alemania (Gebeyehu, 2006).

Sequía

El rendimiento promedio de semilla de todas las variedades obtenido en condiciones de sequía fue similar al rendimiento obtenido en frijol 'Flor de Junio' en sequía severa (50% de humedad edáfica durante el ciclo) en invernadero en Cieneguillas, Zacatecas, México (Acosta *et al.*, 2007). En tanto que comparándolo con el frijol 'Otomí' el rendimiento fue 65% mayor en invernadero con sequía durante la etapa de formación de vainas (Castañeda *et al.*, 2009); las diferencias en rendimiento se deben al menor efecto de la sequía en el número de VP y SP determinados en el presente estudio, las cuales fueron 66 y 74% mayores a las observadas en frijol 'Otomí' (Castañeda *et al.*, 2009).

El IC promedio de las 12 variedades en sequía fue solamente 3% mayor al determinado por Gebeyehu (2006) en promedio de seis variedades de frijol de diferente hábito de crecimiento y contrastantes en su respuesta a la sequía, bajo sequía en invernadero en Alemania.

Riego vs sequía

La sequía durante la floración y el periodo de formación de semilla redujo el RS y sus componentes. Este mismo efecto se ha observado por otros autores en condiciones de invernadero, para el RS, BMA, VP y SP (Boutraa y Sanders, 2001; Rainey y Griffiths, 2005; Nuñez *et al.*, 2005; Acosta *et al.*, 2009; Lanna *et al.*, 2016). Tal como también fue observado por Acosta *et al.* (2009) en el IC, el cual también fue afectado por la sequía, en el periodo de formación de la semilla en ocho genotipos de frijol de diferente hábito de crecimiento sometidos a sequía en la etapa reproductiva.

El déficit hídrico también disminuyó los GDF y GDMF; los GDF pasaron de 689 en riego a 676 °Cd en sequía, mientras que los GDMF de 1228 cambiaron a 1185 °Cd al pasar de riego a sequía. Por su parte, Barrios *et al.* (2011) observaron el mismo efecto en la madurez fisiológica de seis variedades de frijol ‘Flor de Mayo’, una variedad ‘Flor de Junio’ y un criollo Michoacán 128, en condiciones de riego y temporal en campo.

Interacción variedades x niveles de humedad

Las variedades que presentan mayor disminución en el RS o algún otro componente del rendimiento o característica al pasar de riego a sequía, se consideran variedades susceptibles a sequía, en promedio, la disminución en el RS y sus componentes fue de 38% para el RS, 33% en la BMA y 38% en el número de VP al pasar de riego a sequía. En Alemania Gebeyehu (2006) en condiciones de invernadero observó una reducción en el RS y BMA similar a la observada en este trabajo de investigación. Castañeda *et al.* (2009) observaron que la sequía durante el periodo de formación de vaina redujo 40% el número de VP con respecto a riego en el cultivar ‘Otomí’ en condiciones de invernadero en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Relación entre el rendimiento de semilla y sus componentes

La correlación entre el RS y sus componentes, mostró que al pasar de riego a sequía las variedades de frijol que disminuyeron en mayor medida su RS también disminuyen aquellos componentes del rendimiento que están más estrechamente relacionados con dicha reducción. Szilagyi (2003) indica que la disminución en el RS (78%) bajo condiciones de estrés hídrico en frijol en campo estuvo más asociada con la disminución en el número de vainas por planta (60%) que con el número de semillas por vaina (26%) y peso de 100 semillas (13%), el rendimiento de semilla (60%) y número de vainas (63%) más que el número de semillas por vaina (29%), el índice de cosecha (26%) y el tamaño semilla (22%) (Nuñez *et al.*, 2005).

Las variedades ‘Flor de mayo’ mostraron mayor rendimiento de semilla y componentes del rendimiento que las variedades con testa de color negro, tanto en riego como en sequía, jugando un papel importante la biomasa aérea final, el índice de cosecha y el peso individual de semilla en la determinación del rendimiento.

En otro estudio, bajo condiciones de secano en 12 variedades de frijol, Romero *et al.* (2015) al trabajar con nueve genotipos de frijol del tipo ‘Flor de Mayo’ sugirieron que estas pueden mantener altos umbrales de rendimiento con el mismo número de semillas por m² y un mayor peso individual de semilla, mientras que para los frijoles negros, un mayor umbral de rendimiento se podría obtener con un mayor número de semillas por m².

Por otro lado, Rao *et al.* (2013) observaron que dos genotipos de frijol común y dos de frijol Tepari produjeron mayor rendimiento de semilla bajo condiciones de sequía terminal debido a su mayor capacidad de movilización de fotosintatos de hojas y tallos para el desarrollo de la semilla. También observaron que mayor biomasa foliar, asignación de materia seca a la vaina, reducción de la biomasa del tallo y el índice de cosecha son caracteres que podrían servir para la selección de genotipos superiores para condiciones de estrés hídrico terminal.

Conclusiones

Se presentaron efectos significativos entre los dos regímenes de humedad evaluados y variación significativa entre las variedades para el rendimiento de semilla y sus principales componentes fisiológicos y numéricos. Las variedades tipo flor de mayo FM M38, FM Sol y FM RMC mostraron mayor potencial de rendimiento de semilla en riego y FM M38, FM Sol en sequía. El rendimiento de semilla y sus componentes, se vieron afectados fuertemente por la sequía inducida a partir del inicio de floración. La biomasa aérea final, vainas por planta, semillas por vaina y el peso individual de semilla fueron los componentes del rendimiento más afectados por el estrés hídrico.

Las variedades con menor disminución del rendimiento y componentes del rendimiento en sequía, pueden utilizarse como progenitores en programas de mejoramiento genético para zonas de secano.

Literatura citada

- Acosta, D. E.; Kohashi, S. J. y Acosta, G. J. A. 1997. Rendimiento y sus componentes en frijol bajo condiciones de sequía. *Agric. Téc. Méx.* 23(2):139-150.
- Acosta, D. E.; Amador, R. M. D.; Padilla, R. J. C.; Gómez, D. J. P. y Valadez, M. H. 2007. Biomasa y rendimiento de frijol tipo flor de junio bajo riego y sequía. *Agric. Téc. Méx.* 33(2):153-162.
- Acosta, D. E.; Acosta, G. J. A.; Trejo, L. C.; Padilla, R. J. C. and Amador, R. M. D. 2009. Adaptation traits in dry bean cultivars grown under drought stress. *Agric. Téc. Méx.* 35(4):416-425.
- Acosta, G. J. A. and Kohashi, S. J. 1989. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. *Field Crops Res.* 20(2):81-93.
- Apáez, B. P.; Escalante, E. J. A. S. y Rodríguez, G. M. T. 2011. Crecimiento y rendimiento del frijol chino en función del tipo de espaldera y clima. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 13(3):307-315.
- Assefa, T.; Beebe, S. E.; Rao, I. M.; Cuasquer, J. B.; Duque, M. C.; Rivera, M.; Battisti, A. and Luchim, M. 2013. Pod harvest index as a selection criterion to improve drought resistance in white pea bean. *Field Crops Res.* 148:24-33.
- Barrios, G. E. J. y López, C. C. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia.* 43:29-35.
- Barrios, G. E. J.; López, C. C.; Acosta, G. J. A. y Canul, K. J. 2011. Efecto del estrés hídrico en el crecimiento y desarrollo de frijol. *Investigación Agropecuaria.* 8(1):1-15.
- Boutraa, T. and Sanders, F. E. 2001. Influence of water stress on grain yield and vegetative growth of two cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 187(4):251-257.

- Castañeda, S. M. C.; Córdova, T. L.; González, H. V. A.; Delgado, A. A.; Santacruz, V. A. and García, S. G. 2009. Physiological performance, yield, and quality of dry bean seeds under drought stress. *Interciencia*. 34(10):748-754.
- Costa, F. M. G.; Thi, A. T. P.; Pimentel, C.; Pereyra, R. R. O.; Zuily, F. Y. and Laffray, D. 2000. Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress. *Environ. Exp. Bot.* 43(3):227-237.
- Escalante, E. J. A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra*. 17(2):149-157.
- Ferreira, M. E.; Abreu, J. P. de M.; Bianco, V. V. and Monteiro, A. 1997. Predicting phasic development of Green beans for processing using a model with high temperatura reduction of termal time accumulation. *Sci. Hortic.* 69(3-4):123-133.
- Gebeyehu, S. 2006. Physiological response to drought stress of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in drought resistance. Cuvillier Verlag. 116 p.
- Geiger, D. R.; Shieh, W. J. and Saluke, R. M. 1989. Carbon partitioning among leaves, fruits, and seeds during development of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 91(1):291-297.
- Lanna, A. C.; Mitsuzono, S. T.; Rios, T. T. G.; Pereira, V. R. and Alves, F. C. M. 2016. Physiological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes, water-stress induced with contrasting response towards drought. *Australian J. Crop Sci.* 10(1):1-6.
- López, F. B.; Johansen, C. and Chauhan, Y. S. 1996. Effect of timing of drought stress on phenology, yield and yield components of a short-duration pigeonpea. *J. Agron. Crop Sci.* 177(5):311-320.
- Martinez, J. P.; Silva, H.; Ledent, J. F. and 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.). *Eur. J. Agron.* 26(1):30-38.
- Mwanamwenge, J.; Loss, S. P.; Siddique, K. H. M. and Cocks, P. S. 1999. Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Eur. J. Agron.* 11(1):1-11.
- Nuñez, B. A.; Hoogenboom, G. and Nesmith, D. S. 2005. Drought stress and the distribution of vegetative and reproductive traits of a bean cultivar. Piracicaba, Brazil. *Sci. Agric.* 62(1):18-22.
- Rainey, K. M. and Griffiths, P. D. 2005. Differential response of common bean genotypes to high temperature. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 130(1):18-23.
- Ramirez, V. P. and Kelly, J. D. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*. 99(2): 127-136.
- Rao, I.; Beebe, S.; Polania, J.; Ricaurte, J.; Cajiao, C.; García, R. and Rivera, M. 2013. Can Tepary bean be a model for improvement of drought resistance in common bean?. *Afr. Crop Sci. J.* 21(4):265-281.
- Romero, F. C. S.; López, C. C.; Miranda, C. S.; Kohashi, S. J.; Aguilar, R. V. H. y Martínez, R. C. G. 2015. Variabilidad del rendimiento de semilla y sus componentes en frijol común bajo condiciones de temporal. *Cienc. Agríc. Informa.* 24(1):7-17.
- Szilagyi, L. 2003. Influence of drought on seed yield components in common bean. *Bulgarian J. Plant Physiol. Special Issue*: 320-330 pp.
- Xia, M. Z. 1997. Effect of soil drought during the generative development phase on seed yield and nutrient uptake of faba bean (*Vicia faba* L.). *Australian J. Agric. Res.* 48:447-451.