



ADAPTACION DEL FRIJOL TIPO FLOR DE JUNIO A DIFERENTES AMBIENTES DE MEXICO

[ADAPTABILITY OF THE FLOR DE JUNIO DRY BEAN TYPE TO DIFFERENT ENVIRONMENTS IN MEXICO]

Acosta-Gallegos J.A.^{1*}, E. Espinoza-Trujillo¹, B.M. Sanchez-Garcia¹,
Y. Jimenez-Hernandez¹, R. A. Salinas-Perez², R. Rosales-Serna³,
R. Zandate-Hernandez⁴ and C. Gonzalez-Rivas⁵

¹INIFAP-CEBAJ, Km 6.5 Carretera Celaya a San Miguel de Allende, CP 38118,
Celaya, Gto. Mexico

* Corresponding author

RESUMEN

Se determinó el rendimiento de 14 líneas y dos variedades comerciales de frijol tipo Flor de Junio en ambientes de temporal y riego del centro de México con el objetivo de identificar líneas de alto rendimiento con baja interacción genotipo x ambiente. El ensayo se estableció en 15 ambientes (combinación localidad/año) bajo un diseño experimental de Látxice 4x4 con cuatro repeticiones. En los ambientes de temporal la siembra se realizó en julio después de la ocurrencia de lluvias, y en las de riego en noviembre y febrero dependiendo de la localidad; a cada combinación de localidad y año se consideró como un ambiente. Con la información del rendimiento se realizó un análisis por localidad y uno combinado para determinar la importancia de cada factor, a su vez, para determinar los efectos de la interacción genotipo x ambiente (IGA) se utilizó el modelo AMMI. En el análisis combinado el 70.4 % de la variación se debió al efecto del ambiente, seguido por el efecto de IGA con el 11.8 % y en tercer lugar se ubicó el factor genotipo. Las líneas con alto rendimiento medio fueron FJB 08061, FJB 08054 y FJB 08004, con 1800 kg ha⁻¹, rendimiento apenas superior al de los testigos que produjeron un mayor rendimiento que la mitad de las líneas en evaluación. El rendimiento de la línea FJB 08004 fue comparativamente alto y estable. Otros genotipos mostraron adaptación específica, por lo que su utilización debe considerarse en localidades específicas. El análisis AMMI permitió detectar localidades contrastantes en el estado de Guanajuato que deberán utilizarse en la evaluación de germoplasma mejorado para obtener información confiable asociada a un menor insumo de recursos.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L.; adaptación; estabilidad; interacción genotipo x ambiente; ambientes de riego y temporal.

SUMMARY

The yield response of 14 bred lines and two commercial cultivars of the Flor de Junio bean type was studied in rainfed and irrigated environments of central Mexico with the aim of identifying high yielding lines of low genotype by environment interaction. The trial was established at 15 environments (site/year combination) under a 4x4-lattice design with four replications. At the rainfed environments sowing was done in July after the onset of the rainy season and at those irrigated in November or February depending on the location. Yield data were analyzed per trial and to determine the importance of each factor a combined analysis was conducted. In order to determine the genotype x environment interaction the multivariate AMMI model was used. By means of the combined analysis we found that 70.4 % of the phenotypic variation was due to the environment, 11.8 % to the GxE interaction and in third place the genotypic effect. Lines of high yield average were FJB 08061, FJB 08054 and FJB 08004, with 1800 kg ha⁻¹, a yield slightly superior to the controls that out yielded more than half of the lines in the trial. The yield of line FJB 08004 was relatively high and stable across environments. Other lines displayed specific adaptation; hence their use should be at specific environments. The AMMI analysis allowed for the identification of environments with contrasting responses in Guanajuato, which should be utilized in the evaluation of improved germplasm in order to obtain reliable information at a low cost.

Key words: *Phaseolus vulgaris* L.; Adaptation; stability; interaction genotype x environment; irrigated and rainfed environments.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético convencional del frijol, el cual ha sido exitoso, ha tenido como objetivo incrementar el rendimiento y su estabilidad, obtener resistencia a factores bióticos (plagas y enfermedades), tolerancia a factores abióticos (sequía, baja fertilidad, acidez del suelo, temperaturas desfavorables) y mejorar su calidad nutricional e industrial, entre otros (Beaver y Osorno, 2009). En las últimas fases del proceso de mejoramiento es necesario valorar las líneas candidatas a nuevas variedades en una amplia gama de condiciones ambientales para identificar las de alta productividad y estabilidad, de características agronómicas superiores. Sin embargo, las causas primarias de las diferencias entre genotipos en relación a la estabilidad de su producción se deben a la interacción genotipo x ambiente (IGA), de tal forma que la respuesta de los genotipos dependerá de las condiciones ambientales específicas donde se produzcan (Ferreira *et al.*, 2006).

La magnitud de la IGA se incrementa cuando las diferencias entre genotipos es amplia en los caracteres que les confieren resistencia a uno o más factores ambientales adversos o bien debido a una amplia variación entre ambientes en la magnitud de la incidencia de dichos factores (Annicchiarico, 2009, Chataika *et al.*, 2010). Entre ellos destacan las enfermedades, plagas, precipitación pluvial, fertilidad y profundidad del suelo, temperatura, etcétera; no obstante, parte de la interacción queda sin explicación (Ferreira *et al.*, 2006).

Por parte de los cultivos, la estructura genética del los genotipos también influye en la magnitud de la IGA.: aquellos con mayor homogeneidad tienen menor capacidad de amortiguar la variación ambiental en comparación con los genotipos heterogéneos (Annicchiarico, 2009). Por la importancia de dicha interacción, en el programa de mejoramiento genético de frijol de temporal en el altiplano semiárido de México es prioridad el establecimiento de ensayos de rendimiento en al menos 10 localidades cada año (Acosta y Ochoa, 1992).

Al tomar en cuenta la IGA existen dos formas de mejorar el nivel de rendimiento: por un lado se selecciona el mejor genotipo, aquel de alto rendimiento, y adaptado a la mayoría de los ambientes de producción de cierta región, y por otro se subdivide la región en áreas homogéneas donde se presente menor interacción y luego se aplican métodos de fitomejoramiento para recomendar un genotipo para cada una de las áreas (Gauch y Zobel, 1997). En este sentido, se ha propuesto usar el concepto de estabilidad a la respuesta del rendimiento

en el tiempo (años o ciclos agrícolas) y aplicar el concepto de adaptación a las respuestas de los genotipos sobre el espacio geográfico (localidades o sitios) (Annicchiarico, 2009).

Con el tiempo han surgido una diversidad de métodos para escudriñar estadísticamente la IGA: los que están basados en el análisis de varianza, los que usan el análisis de regresión y los multivariados, de los cuales destaca el método AMMI (Ferreira *et al.*, 2006). En el presente estudio se utilizó el modelo multivariado AMMI para conocer la respuesta del rendimiento de 14 líneas y dos variedades comerciales de frijol tipo Flor de Junio en ambientes de temporal y de riego, principalmente en localidades del centro de México. Se utilizaron las variedades comerciales Flor de Junio Marcela y Silvia como testigos, en virtud de que son de amplio uso en los estados de Guanajuato y Querétaro bajo ambas condiciones, riego y temporal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Se sembró un ensayo de rendimiento de 14 líneas y dos variedades comerciales como testigos, Flor de Junio Marcela (Castellanos *et al.*, 2003) y Flor de Junio Silvia en 11 localidades: Celaya, Ocampo y Valle de Santiago, en Guanajuato; Durango y F.I. Madero, Durango; Santiago Ixcuintla, Nayarit; Tecamachalco, Puebla; Guasave, Sinaloa; Villa de Arriaga, San Luis Potosí; Texcoco, Estado de México y en Calera, Zacatecas. En algunas localidades se sembró en el ciclo agrícola de temporal 2008, y en las localidades de temporal la siembra se realizó en los ciclos agrícolas 2008 y 2009. En los ambientes de temporal la siembra se realizó después del inicio de la temporada de lluvias, comúnmente en el mes de julio, mientras que en las siembras de riego se sembró en tierra húmeda después de un riego (Tabla 1). De esta forma, se consideró como un ambiente a cada combinación de localidad y año, de acuerdo con Gauch y Zobel (1997); por lo anterior, el ensayo se condujo en 15 ambientes.

Diseño experimental y conducción del ensayo

En cada ambiente se utilizó un diseño experimental tipo látice 4x4 con 4 repeticiones. La unidad experimental consistió en dos surcos de 6 m de longitud. Como todos los genotipos en evaluación son de hábito de crecimiento y fenología similar, es decir de similar aptitud competitiva, no se considero necesario establecer surcos orilleros en las parcelas experimentales. Durante el ciclo del cultivo se realizaron las labores culturales comunes en la región de acuerdo con el sistema de cultivo y área de

producción, las cuales consistieron en dos cultivos mecánicos y un deshierbe manual; no se controlaron enfermedades y ocasionalmente plagas; los resultados del rendimiento que se reportan se ajustaron a un 14% de humedad en el grano.

Análisis estadístico del rendimiento de grano

En cada ambiente se determinó el rendimiento de grano ajustado a 14 % de humedad. Se realizó un análisis convencional de acuerdo al diseño utilizado en cada localidad, un análisis combinado y se utilizó el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI, por sus siglas en inglés). Para éste último análisis se usó el algoritmo que ejecuta el programa SAS (Windows versión 9.1) desarrollado por Burgueño *et al.* (2003).

$$\bar{Y}_{ij} = \mu + \tau_i + \delta_j + \sum_{k=1}^t \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

Donde \bar{Y}_{ij} es la media de i -ésimo genotipo en la j -ésima localidad, μ es la media general, τ es el efecto del genotipo, δ es el efecto de la localidad, λ son los valores singulares constantes, α y γ son los vectores singulares para genotipos y localidades, respectivamente; ε es el error residual con

distribución normal $(0, \sigma^2/r)$, siendo σ^2 la varianza del error conjunto y r es el número de repeticiones).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de variedades en ambientes

En los ambientes (DD8T, B9R y SE9R) el rendimiento de todas las líneas fue mayor que su promedio (Tabla 2). En contraste, en los ambientes B7T, O8T, T8T, DM8T, N8R y SI8R se registraron bajos rendimientos en todos los genotipos, menores a sus promedios. En el resto de ambientes los genotipos respondieron diferencialmente, con valores cercanos al promedio, algunos ligeramente mayores y otros ligeramente menores al promedio. Esta respuesta diferencial de los ambientes de prueba indica la diferencia en las condiciones agroclimáticas de los mismos. Los genotipos superiores en rendimiento promedio fueron FJB 08061 (FJ61), FJB 08054 (FJ54) y FJB 08004 (FJ04), con 1800 kg ha⁻¹, rendimiento apenas superior al de los testigos, los cuales produjeron un mayor rendimiento que la mitad de las líneas en evaluación.

Tabla 1. Características de las localidades donde se condujo el ensayo con genotipos de grano tipo Flor de Junio.

Año	Localidad	Sistema de producción	Fecha de siembra	Altitud m	Coordenadas	Clave
2007	CEBAJ, Celaya, Gto.	Temporal	28/07	1752	20°32'N, 100°48'O	B7T
2008	CEBAJ, Celaya, Gto.	Temporal	16/07	1752	20°32'N, 100°48'O	B8T
2008	Ocampo, Gto.	Temporal	11/07	2125	21°31'N, 101°32'O	O8T
2008	Valle de Santiago, Gto.	Temporal	17/07	1779	20°21'N, 101°19'O	V8T
2008	Texcoco, Edo. de México	Temporal	13/07	2250	19°29'N, 98°53'O	T8T
2008	Villa de Arriaga, SLP.	Temporal	08/07	2145	21°56'N, 101°20'O	SL8T
2008	Tecamachalco, Puebla	Temporal	24/06	1980	20°52'N, 99°04'O	P8T
2008	F.I. Madero, Durango	Temporal	15/07	1968	24°24'N, 104°20'O	DM8T
2008	Durango, Durango	Temporal	10/07	1878	23°59'N, 104°37'O	DD8T
2008	Calera, Zacatecas	Temporal	12/07	2474	23°27'N, 102°55'O	Z8T
2008	Sgo. Ixcuintla, Nayarit	Temporal	06/11	16	21°49'N, 105°11'O	N8R
2008	Guasave, Sinaloa	Riego	10/11	50	25°19'N, 108°05'O	SI8R
2009	CEBAJ-Lote 14, Celaya, Gto.	Riego	26/02	1775	20°58'N, 100°82'O	B9R
2009	SENGUA, San L. de la Paz, Gto.	Riego	24/03	2013	21°06'N, 100°32'O	SE9R
2007	CEBAJ, Celaya, Gto.	Riego	04/03	1775	20°58'N, 100°82'O	B7R

Dos factores principales, entre otros, pudieron influir en la respuesta para rendimiento en las líneas evaluadas: 1) el antecedente de que las líneas incluyen como progenitor femenino a la variedad testigo, Flor de Junio Marcela, y 2) durante el proceso de selección se dio énfasis a la recuperación de las características del grano de Flor de Junio Marcela porque es la variedad dominante en el mercado, situación que promueve la eliminación de verdaderas líneas recombinantes con características agronómicas superiores por 'defectos' en las características del grano o con supuestos problemas para la comercialización. Diversos autores han señalado lo anterior como un impedimento o dificultad en el progreso del mejoramiento genético del frijol (Rosales *et al.*, 2005). También se ha mencionado la reducción de la diversidad genética al priorizar las cruces entre fuentes donantes y progenitores recurrentes dentro del tipo comercial (Singh, 2001).

La línea FJB 08054 (FJ54) fue la de mayor rendimiento en cinco ambientes de 15 analizados, comparada con los testigos; en contraste, la línea FJB 08041 (FJ41) presentó el menor rendimiento en seis ambientes (Tabla 3). Las otras líneas fueron sobresalientes en distintos ambientes, de tal forma que no se detectó una línea que fuera la superior o la peor en todos los ambientes. Lo anterior indica que el tipo de IGA fue cruzada, ya que el orden de los genotipos cambió de ambiente en ambiente (Kang, 2002). Dicha condición ha sido un dilema en los programas de mejoramiento, por la cual Acosta y Ochoa (1992) indicaron que para lograr la meta de desarrollar variedades mejoradas para condiciones de temporal existen dos rutas: formar variedades adaptadas a las condiciones de temporal, aptas para toda una región, o variedades con rendimiento estable destinadas a localidades específicas como las irrigadas o áreas de temporal favorable. En determinados casos se puede considerar que las variedades de amplia adaptación son aquellas que presentan resistencia múltiple a enfermedades (López *et al.*, 2003;) o bien una fenología adecuada a varios sistemas de producción (Berger *et al.*, 2006).

INTERACCIÓN GENOTIPO X AMBIENTE

El análisis de varianza combinado (Tabla 4) mostró que el 70.4 % de la variación se debió al efecto del ambiente, seguido por el efecto de IGA (11.8 %) y en tercer lugar se ubicó el factor genotipo. En otros estudios la magnitud de la suma de cuadrados (SC) de localidades (Chataika *et al.*, 2010) o de ambientes (combinación de localidades y épocas de siembra) (Goncalves *et al.*, 2010) ha superado a la SC de los factores genotipo e IGA. Conforme sean más diversos los genotipos y los ambientes el porcentaje de la SC debido a la IGA podrá ser incrementado (Gauch y

Zobel, 1997); en este caso se infiere que la contribución de los ambientes a la IGA fue mayor ya que todas las líneas en evaluación están emparentadas. La mayor contribución del ambiente a la SC indica que los ambientes son diversos. Además, la mayor contribución de la IGA a la SC, comparada con el efecto de los genotipos, indica que hubo diferencias sustanciales en la respuesta de los genotipos a través de los ambientes (Mohammadi *et al.*, 2010).

El análisis multivariado de la IGA (AMMI) indicó que 55 % de la variación se explica con los dos primeros componentes principales, y al incluir el tercero se explica el 68.9 %. Goncalves *et al.* (2010) al evaluar 14 líneas de frijol establecidas en 24 localidades encontraron que un 83.4 % de la SC de la IGA se explicó por tres componentes principales. Esto es relevante porque las inferencias derivadas de la IGA dependen de la magnitud de la variación explicada por los dos primeros componentes principales (Rao y Prabhakara, 2005). Sin embargo, según el criterio de Pereira *et al.* (2009) los tres primeros componentes principales del análisis AMMI deben explicar más del 60 % para considerarlo suficiente y al menos 70 % como satisfactorio.

En la Figura 1 se presenta la dispersión de los genotipos y localidades en el espacio comprendido por los dos primeros componentes principales. Los genotipos y localidades cercanos al cero presentan baja interacción, la cual es mayor para los más alejados; por lo que se infiere que los primeros son los más estables (Carbonell *et al.*, 2004). En contraste, los valores alejados, ya sea positivos o negativos, indican adaptación específica de un genotipo a un ambiente dado (Sanni *et al.*, 2009) y son genotipos altamente interactivos con el ambiente (Asfaw *et al.*, 2009). La proximidad entre pares de genotipos o de localidades (donde el ángulo formado por las proyecciones genotipo-origen-localidad es menor) indica la similitud en la magnitud de la IGA en base a los valores de los CP de cualquier signo (Annicchiarico, 2002).

La adaptación de los genotipos convencionalmente se valora en función de su rendimiento, con dos tipos: la adaptación amplia y la específica (Annicchiarico, 2009). Para la adaptación amplia implica desarrollar una variedad con desempeño aceptable en toda la región, mientras que para la adaptación específica significa producir diferentes variedades, cada una diferenciada por un desarrollo favorable en cada subregión (Annicchiarico, 2009). En la Figura 1 se observa que los genotipos de adaptación amplia se caracterizan por poseer valores cercanos a cero, mientras que los de adaptación ambiental específica son los alejados del origen.

Tabla 2. Porcentaje de rendimiento en relación al valor promedio de cada línea en los ambientes de prueba.

Línea	Ambiente															Kg ha ⁻¹	CV (%)
	B7T	B8T	O8T	V8T	T8T	P8T	SL8T	DM8T	DD8T	Z8T	N8R	SI8R	B9R	B7R	SE9R		
FJS	-65.4	-1.2	-5.7	-5.1	-78.2	-8.7	-2.6	-38.4	+70.9	-4.9	+1.4	-18.8	+99.3	+28.2	+29.3	1752.8	45.5
FJM	-74.7	+8.0	-5.3	-15.8	-66.3	+21.2	-10.6	-37.5	+49.5	+2.0	-4.5	-22.9	+145.2	-3.3	+15.0	1732.6	51.1
FJ60	-67.2	+17.4	-32.2	+23.0	-55.1	+47.5	-22.4	-20.3	+60.1	-19.9	-18.9	-24.3	+81.2	-31.6	+62.9	1582.3	45.6
FJ64	-69.2	+17.1	-26.4	+1.6	-22.2	+27.3	-0.8	-29.7	+57.0	+4.4	-21.0	-30.4	+51.3	-3.9	+44.9	1596.8	35.1
FJ43	-60.2	+27.2	-25.4	+1.8	-57.2	+30.0	+2.5	-19.2	+47.9	+5.8	-29.5	-32.3	+48.2	-14.7	+75.1	1512.6	39.6
FJ92	-41.8	-2.8	-26.6	+20.6	-71.9	+43.9	+29.1	-45.9	+55.8	+5.5	-23.2	-37.6	+81.0	-22.1	+35.8	1389.9	43.4
FJ63	-68.3	+21.4	-30.6	+2.4	-32.7	+25.0	+26.0	-21.7	+22.3	-11.9	-19.0	-41.4	+100.9	-46.7	+74.2	1627.1	45.9
FJ61	-68.2	+3.0	-21.3	-26.1	-29.8	+47.8	-0.4	-18.2	+48.6	+2.6	-22.9	-21.8	+102.9	-42.6	+46.5	1819.3	44.1
FJ93	-55.4	+0.7	-20.4	-18.5	-29.0	+31.2	-23.1	-28.9	+67.9	-33.3	32.1	-29.3	+79.0	-2.8	+29.9	1448.7	39.4
FJ41	-74.1	+35.6	-33.8	-35.9	-42.0	+9.8	+17.6	-8.7	+52.4	+5.2	-35.9	-44.0	+92.6	-18.4	+79.7	1457.5	48.3
FJ58	-75.7	+10.5	-24.8	-17.9	-33.0	-3.0	-4.8	-8.2	+53.5	+17.6	-5.7	-33.0	+65.3	+1.1	+58.3	1786.4	37.7
FJ54	-75.5	+8.9	-37.4	-44.9	-27.0	+34.6	-8.4	-7.6	+45.0	+16.4	-21.6	-23.3	+101.4	-19.2	+58.5	1832.7	45.2
FJ50	-60.4	+15.0	-33.7	-37.8	-66.3	-0.9	-11.7	-6.2	+80.4	-12.2	-5.9	-28.5	+104.2	+11.1	+53.0	1479.9	48.0
FJ32	-66.0	-38.8	-5.3	-26.7	-63.3	+7.9	+16.5	-21.7	+91.9	-1.2	-24.0	-28.4	+141.2	-6.3	+24.0	1575.1	54.6
FJ27	-65.2	+15.9	-27.7	-27.8	-41.4	+26.3	-3.0	-21.1	+38.5	-0.2	-18.3	-38.5	+98.3	-5.4	+69.5	1636.1	43.7
FJ04	-72.8	-4.4	-34.1	-27.8	-32.8	+48.8	+1.6	-41.7	+54.0	+2.8	-1.1	-39.1	+97.3	-8.5	+58.0	1881.1	46.2

Tabla 3. Porcentaje de rendimiento de cada línea en relación al promedio de líneas en un ambiente en particular

Línea	Ambiente														
	B7T	B8T	O8T	V8T	T8T	P8T	SL8T	DM8T	DD8T	Z8T	N8R	SI8R	B9R	B7R	SE9R
FJS	12.0	-1.8	33.9	20.3	-56.5	-21.2	4.6	-13.6	17.9	3.0	25.9	25.7	10.5	55.6	-7.9
FJM	-19.0	6.1	32.9	5.4	-33.5	3.4	-5.1	-13.3	2.0	9.2	17.3	18.0	34.4	16.0	-19.0
FJ60	-4.3	5.4	-13.1	40.8	-19.1	14.9	-24.8	0.9	-0.2	-21.7	-9.1	5.7	-9.3	-25.0	4.7
FJ64	-9.3	6.0	-4.8	17.4	41.6	0.1	-2.9	-10.2	-1.3	3.0	-10.7	-1.9	-23.5	6.3	-6.0
FJ43	11.2	9.1	-8.6	11.4	-26.2	-3.1	-5.1	-2.2	-11.9	-1.1	-24.5	-9.6	-29.1	-10.6	7.6
FJ92	49.4	-23.4	-17.3	21.2	-55.5	-1.5	9.9	-39.8	-14.7	-9.4	-24.3	-23.4	-20.4	-25.0	-23.3
FJ63	-4.9	12.0	-8.5	20.5	24.8	0.1	25.6	2.0	-21.6	-11.4	-6.6	-15.7	3.4	-39.9	15.1
FJ61	6.6	6.2	16.0	-2.8	45.7	32.4	11.0	19.2	6.5	15.4	-0.7	25.7	16.8	-27.7	8.3
FJ93	19.3	-17.3	-6.7	-14.7	17.2	-6.4	-31.8	-17.5	-4.2	-40.3	35.6	-9.6	-18.0	-2.4	-23.5
FJ41	-30.3	12.0	-21.8	-32.4	-3.7	-21.2	5.0	6.5	-12.5	-5.2	-33.9	-28.0	-11.2	-17.6	6.4
FJ58	-20.0	11.9	8.8	6.1	36.5	-14.6	4.2	31.3	7.9	29.8	19.3	5.7	-6.6	25.1	14.9
FJ54	-17.1	13.2	-7.1	-27.0	52.6	21.5	2.8	35.6	4.7	31.8	1.8	24.2	16.8	2.6	18.0
FJ50	8.0	-3.5	-20.5	-33.5	-43.2	-27.8	-20.0	11.2	5.1	-19.7	-1.3	-6.5	-4.4	13.9	-8.0
FJ32	-1.1	-45.4	20.8	-16.5	-34.1	-16.3	12.4	-1.3	19.0	-3.8	-15.2	-0.4	20.2	2.3	-20.6
FJ27	5.2	7.5	-4.2	-14.6	9.3	1.8	-2.8	3.4	-10.8	0.9	-5.3	-11.1	2.7	7.2	12.7
FJ04	-5.7	1.9	0.4	-1.8	44.0	37.9	17.0	-12.2	14.1	19.5	31.7	1.2	17.4	19.2	20.8
kg ha ⁻¹	541.8	1763.6	1234.8	1382.7	877.2	2030.6	1632.5	1249.0	2539.5	1618.1	1411.6	1132.2	3160.2	1443.5	2461.5
CV (%)	18.9	15.9	17.6	21.7	38.6	19.0	15.2	18.8	12.0	18.9	20.7	16.8	18.3	24.1	15.5

Tabla 4. Análisis de varianza general y componentes principales de interacción G x A usando el modelo AMMI para rendimiento de grano de 16 genotipos de frijol Flor de Junio cultivados en 15 ambientes en el centro de México.

Fuente de Variación	GL	SC	Proporción (%)	CM
Repetición	2	0.275	0.06 ^ξ	0.137 ^{ns}
Ambiente	14	311.1	70.4 ^ξ	22.224 **
Genotipo	15	15.8	3.5 ^ξ	1.058 **
Genotipo x Ambiente	210	52.2	11.8 ^ξ	0.248 **
CP1	28	17.1	32.8 ^ξ	0.613**
CP2	26	11.6	22.2 ^ξ	0.446**
CP3	24	7.2	13.9 ^ξ	0.303**
CP4	22	4.9	9.5 ^ξ	0.226*
CP5	20	3.0	5.8 ^ξ	0.151 ^{ns}
CP6	28	2.3	4.5 ^ξ	0.133 ^{ns}
Error	478	62.3	14.0 ^ξ	0.130
Total	719	441.9		
C. V. (%)	22.1			
Media general (t ha ⁻¹)	1.631			

GL= Grados de libertad; SC= Suma de cuadrados; CM= Cuadrados medios; C.V. = Coeficiente de variación general. ^ξ= Proporción con respecto a la SC total, ^ξ= Proporción con respecto a la SC de la interacción Genotipo x Ambiente (IGA). CP = Componente principal que explican la variación de la IGA. ** =significancia al 1 % de probabilidad de error, * =significancia al 5 % de probabilidad de error, ^{ns}= no significativo.

Las líneas de menor IGA fueron FJB 08058 (FJ58), FJB 08060 (FJ60), FJB 08041 (FJ41) y FJB 08027 (FJ27) en las localidades Z8T, SI8R, O8T, SL8T y DM8T. En contraste, las más alejadas del origen fueron los testigos FJM y FJS, y las líneas FJB 08032 (FJ32), FJB 08043 (FJ43), FJB 08054 (FJ54), FJB 08061 (FJ61). Las localidades más distanciadas fueron B9R, B7R, V8T, T8T y SE9R, lo cual es indicativo de ambientes que más propician la interacción con los genotipos al ser contrastantes y permitir (los de riego) la expresión del potencial de rendimiento de los genotipos en evaluación. La posición de los ambientes de prueba de Guanajuato, indica que los ambientes de Valle de Santiago y El Bajío, en riego y temporal, y el SENGUA, en riego, son diferentes y pueden proporcionar información valiosa al programa de mejoramiento local, donde se desarrollaron los genotipos en evaluación.

Al considerar el espacio geográfico, Annicchiarico (2009) postula que la adaptación específica no es recomendable ante las predicciones del cambio climático año con año. En contraste, la selección y

recombinación de genotipos con adaptación amplia efectivamente ha permitido incrementar el rendimiento unitario (Holland *et al.*, 2002).

Para el análisis y valoración del rendimiento, la estabilidad puede ser de dos tipos: la estática que es equivalente a la homeostasis y se aplica a los genotipos estables que mantienen un rendimiento constante en ambientes, o cuando el rendimiento es consistente entre años dentro de localidades. La estabilidad es dinámica cuando el rendimiento del genotipo en cada ambiente es paralelo al promedio de los genotipos; en este caso, la IGA tiende a cero (Annicchiarico, 2009). Desde la perspectiva de los productores es más relevante la estabilidad del rendimiento en el tiempo; por lo que es más importante la estabilidad estática que la dinámica. Sin embargo, la alta estabilidad de genotipos puede asociarse con bajo rendimiento promedio o viceversa, complicando la selección de la mejor variedad (Annicchiarico, 2009). En el caso del frijol se buscan genotipos de adaptación amplia y estables (Pereira *et al.*, 2009).

Segundo Componente Principal

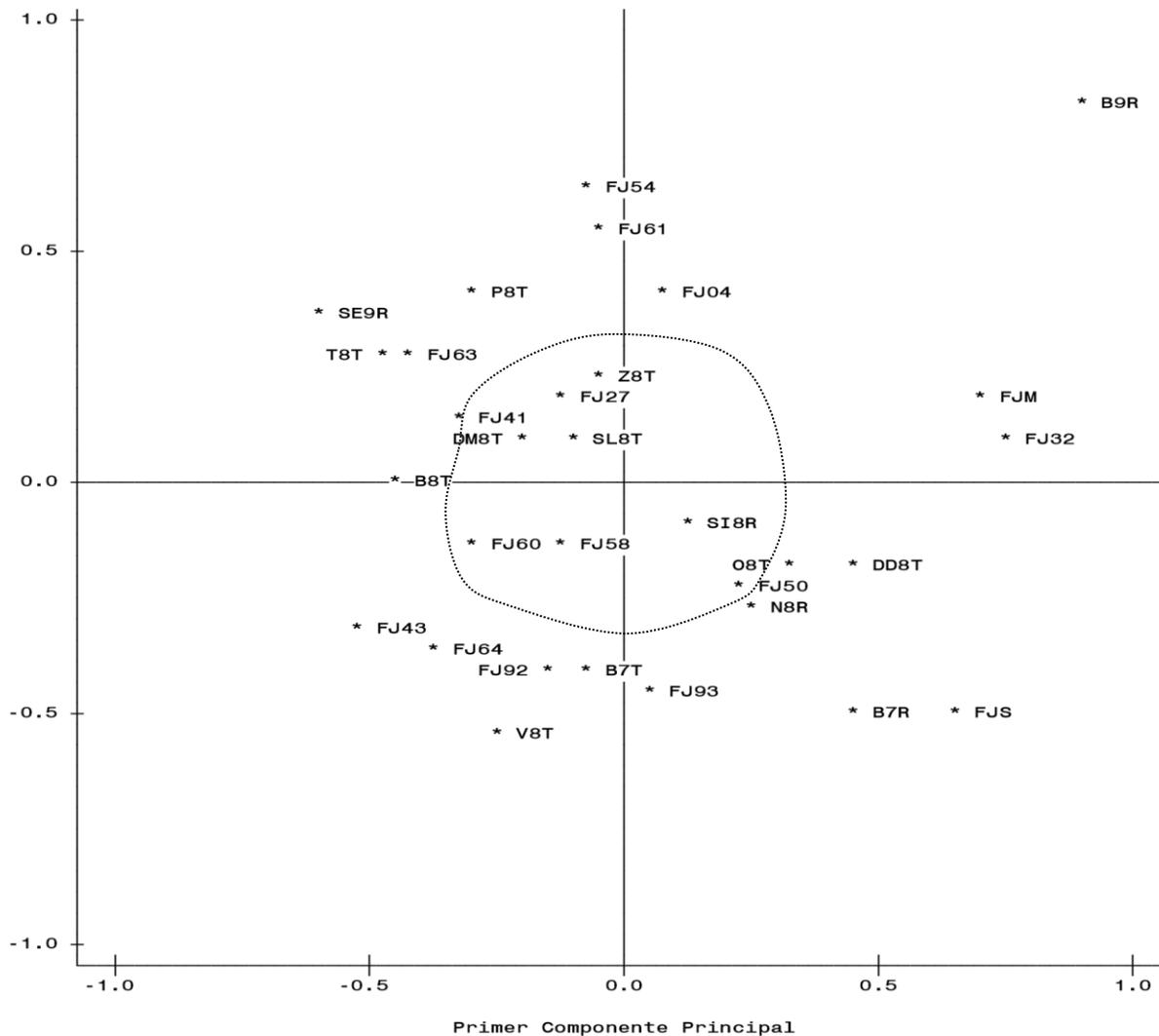


Figura 1. Proyección de los dos primeros componentes principales, generados con el análisis AMMI, y dispersión de fenotipos en diversos ambientes de producción en función de la magnitud de la interacción genotipo x ambiente.

En la grafica del CP1 relacionado al rendimiento (Figura 2) se observa que los genotipos o ambientes que se encuentran alineados en proyecciones verticales tienen rendimiento similar, en tanto que, aquellos ubicados en el mismo nivel horizontal presentan interacción similar. Por lo anterior, las líneas FJ 04 y FJ 93 presentan un rendimiento diferencial, pero una interacción similar; mientras que la línea FJ 04 presenta un rendimiento similar a los testigos, FJM y FJS, aunque la primera resultó con baja interacción y los testigos con alta. Los genotipos ideales deben encontrarse próximos al eje de las ordenadas (iguales o próximas a valores de cero de CP1) (Rocha *et al.*, 2010); lo que significa que deben ser estables y de alto rendimiento. Por su parte, Goncalves *et al.* (2010) reportaron que las líneas de

frijol más estables presentaron los mayores rendimientos. En otro estudio se reportó que los genotipos de mayor rendimiento fueron los más inestables y que sólo un genotipo fue estable y de alto rendimiento, el cual fue considerado como ideal (Chataika *et al.*, 2010).

Para la interpretación del ACP, la grafica del PC1 con el rendimiento se divide en cuatro cuadrantes con la finalidad de facilitar su análisis: en el ángulo superior izquierdo se agrupan genotipos estables de bajo rendimiento, el ángulo superior derecho agrupa a los ideales, el ángulo inferior derecho incluye a los inestables pero de alto rendimiento, y el ángulo inferior izquierdo incluye a los inestables y de bajo rendimiento (Hassanpanah, 2010). Los genotipos

ubicados a la derecha de la línea promedio de rendimiento (1.6 t ha^{-1}) son los de mayor rendimiento, mientras que los ubicados a la izquierda presentan el menor rendimiento. El grupo de líneas de alto rendimiento y cercanas al origen estuvo conformado por FJB 08004 (FJ04), FJB 08061 (FJ61), FJB 08054 (FJ54) y FJB 08058 (FJ58). Ambos testigos mostraron un rendimiento similar, pero están alejados del origen, lo cual significa que presentan mayor interacción con algunos ambientes; en la actualidad son recomendados para las áreas de riego de Guanajuato y Querétaro. Los ambientes donde se obtuvieron los más altos rendimientos fueron B9R, SE9R y DD8T, este último de temporal en el cual se registraron más de 550 mm de precipitación durante el ciclo del cultivo. En relación a las localidades, las más alejadas del origen son la que más contribuyen a la IGA y en determinados casos son los mejores ambientes para la producción de frijol (Rocha *et al.*, 2010), como son los de riego.

El genotipo ideal es el de mayor rendimiento promedio y estable, mientras que el desfavorable presenta baja estabilidad y bajo rendimiento (Ferreira *et al.*, 2006). El ideal se identifica estadísticamente por contar con la mayor longitud del vector de rendimiento y con valor cercano a cero de PC1 (Yan, 2002). Los genotipos que se ubicaron en el cuadrante II fueron FJM y FJS, pero se diferenciaron por ser de mayor IGA; en contraste, FJB 08004 (FJ04) perteneció a dicho grupo y se caracterizó por presentar la menor IGA. En este contexto FJ04 presentó una respuesta ideal (Figura 2) y fue uno de los que obtuvo mayor rendimiento (Tabla 1). Los ambientes donde se identificaron los genotipos superiores fueron B9R y DD8T, de riego y temporal favorable, respectivamente. Tales ambientes fueron favorables para el desarrollo del cultivo y permitieron la expresión del potencial de rendimiento, respuesta independiente de la amplia adaptabilidad y estabilidad del rendimiento.

Los genotipos de pobre respuesta (cuadrante IV) en este estudio fueron FJB 08092 (FJ92), FJB 08041 (FJ41), FJB 08060 (FJ60), FJB 08064 (FJ64) y FJB 08043 (FJ43). Las localidades donde se identificaron genotipos de esta clase fueron B7T, T8T, DM8T, V8T y SL8T. Todas estas localidades fueron de temporal limitativo (bajo rendimiento), lo que sugiere que la selección de germoplasma para ambientes de este tipo debe llevarse a cabo bajo esas condiciones. El germoplasma utilizado en la presente investigación fue desarrollado en la región de El Bajío, de clima favorable para el cultivo de frijol.

Los materiales genéticos de amplia adaptación poseen estabilidad del rendimiento ante la inherente variabilidad ambiental en los agroecosistemas, y la

adaptación específica permite incrementar el rendimiento significativamente en ambientes de mayor aplicación de insumos y de tecnología, como los desarrollados para condiciones de riego. La estabilidad del rendimiento a lo largo del tiempo es conveniente para los productores, mientras que la estabilidad en el espacio regional es benéfico para las compañías semilleras (Kang, 2002) porque no tienen que multiplicar y distribuir distintas variedades para áreas reducidas sino, pocas variedades para extensas regiones.

Uno de los factores ambientales asociado con la mayor interacción de los genotipos y con el bajo rendimiento unitario de frijol es el nivel de precipitación pluvial en las localidades de temporal (Chataika *et al.*, 2010), para lo cual deben seleccionarse los genotipos que demuestren mayor resistencia a la sequía por la condición de humedad deficitaria que puede presentarse en las zonas productoras de frijol para temporal del altiplano semiárido (Acosta y Adams, 1991).

En condiciones de humedad residual, característico de zonas tropicales, el factor que más contribuye en la reducción del rendimiento de genotipos de frijol es la temperatura del aire, principalmente durante el periodo de floración y formación de vainas (Carbonell *et al.*, 2004). Sin embargo, otros factores bióticos como las plagas de insectos y enfermedades son causantes de bajo rendimiento en sitios específicos (Chataika *et al.*, 2010). En el caso de algunas variedades de frijol, cultivadas en México, para las de tipo negro opaco en la región tropical, la estabilidad del rendimiento está influida por la resistencia múltiple a enfermedades y adaptación a suelos ácidos (López *et al.*, 2003). Por su parte el frijol azufrado en el ciclo otoño/invierno, destaca por su tolerancia a temperaturas subóptimas (Padilla *et al.*, 2008). De esta manera, la resistencia a enfermedades es deseable para que los genotipos de frijol presenten estabilidad del rendimiento, lo que equivale a mayor homeostasis en el curso del tiempo (Bruzi *et al.*, 2007).

Otros trabajos proponen considerar los componentes del rendimiento para precisar las decisiones en la selección de genotipos con base en la magnitud de la IGA. Santos *et al.* (1982) ensayando los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russel, demostraron que el número de vainas por planta es un carácter estable. Por otra parte, el tamaño de la semilla del frijol también se considera un carácter estable bajo temporal (Acosta *et al.*, 1988), verificado con el análisis AMMI, y cuya variación se explica en mayor magnitud por el efecto del genotipo (Vasic *et al.*, 2010).

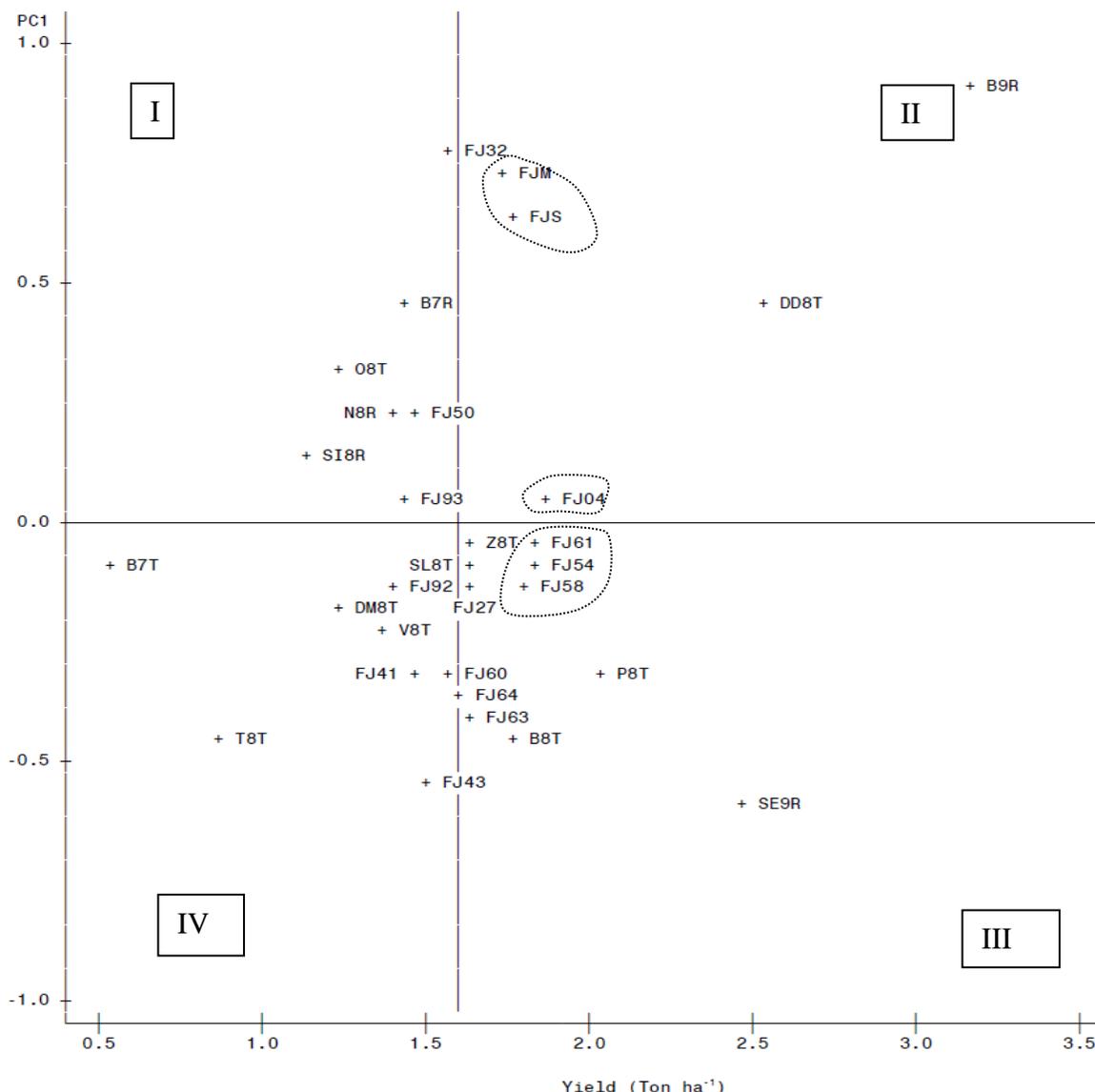


Figura 2. Grafica del primer componente principal y el rendimiento de grano de las líneas y por ambiente.

CONCLUSIONES

A realizar el análisis de varianza combinado del rendimiento se observó que el ambiente de las localidades de prueba fue el factor que más influyo en la variación observada, mientras que los efectos de IGA y del genotipo fueron significativos pero de menor magnitud. La inclusión de ambientes extremos para la conducción del ensayo de rendimiento, de riego y temporal limitativo, fueron la causa de la alta significancia del efecto de las localidades.

El análisis AMMI permitió delimitar genotipos en base a su nivel de interacción y rendimiento, de tal forma que la línea FJB 08004 produjo rendimiento alto y estable. Otros genotipos mostraron adaptación específica y debe considerarse su utilización en

localidades específicas. Este análisis permitió detectar localidades contrastantes en el estado de Guanajuato que se para la evaluación de germoplasma mejorado, y obtener información confiable con el consecuente ahorro de recursos.

REFERENCIAS

Acosta-Gallegos, J.A., Ochoa-Márquez, R., Sánchez-Váldez, I. 1988. Efecto del genotipo y del ambiente en algunas características agronómicas del frijol de temporal. *Agricultura Técnica México*. 14:1-15

Acosta-Gallegos, J.A., Ochoa-Márquez, R. 1992. Amplia adaptación vs adaptación específica en frijol de temporal. *In: Reunión de Interacción*

- Genotipo x Ambiente en Genotecnia Vegetal. Guadalajara, Jal. Soc. Mex. Fitogenética, A.C. pp. 297-323
- Acosta-Gallegos, J.A., Adams, M.W. 1991. Plant traits and yield stability of dry bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars under drought stress. *Journal Agricultural Science, Cambridge* 117: 213-219.
- Annicchiarico, P. 2002. Genotype x environment interactions. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. *FAO Plant Production and Protection Paper* 174, Rome, Italy, p.115
- Annicchiarico, P. 2009. Coping with and exploiting genotype-by-environment interactions. In: Ceccarelli, S., Guimarães, E.P., Weltzien, E. (eds.), *Plant breeding and farmer participation*. FAO, Rome, Italy. pp.519-564
- Asfaw, A., Alemayehu, F., Gurum, F., Atnaf, M. 2009. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. *Scientific Research and Essay* 4:1322-1330
- Beaver, J.S., Osorno, J.M. 2009. Achievements and limitations of contemporary common bean breeding using conventional and molecular approaches. *Euphytica* 168:145-175.
- Berger, J.D., Ali, M., Basu, P.S., Chaudhary, B.D., Chaturvedi, S.K., Deshmukh, P.S., Dharmaraj, P.S., Dwivedi, S.K., Gangadhar, G.C., Gaur, P.M., Kumar, J., Pannu, R.K., Siddique, K.H.M., Singh, D.N., Singh, D.P., Singh, S.J., Turner, N.C., Yadava, H.S., Yadav, S.S. 2006. Genotype by environment studies demonstrate the critical role of phenology in adaptation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to high and low yielding environments of India. *Field Crops Research*. 98:230-244
- Bruzi, A.T., Ramalho, M.A.P., Abreu, A.F.B., Ferreira, D.F., Sena, M.R. 2007. Homeostasis of common bean populations with different genetic structures. *Crop Breeding & Applied Biotechnology*. 7:111-116.
- Burgueño, J., Crossa, J., Vargas, M. 2003. SAS programs for graphing GE and GGE biplots: Downloaded from <http://www.Cimmyt.org/Research/Biometrics/bsu.htm>.
- Carbonell, S.A.M., Azevedo-Filho, J.A., Dias, L.A. dos Santos, Garcia, A.A.F., Morais, L.K. 2004. Common bean cultivars and lines interactions with environments. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Braz.), 61(2):169-177.
- Castellanos-Ramos, J.Z., Guzmán-Maldonado, S.H., Acosta-Gallegos, J.A., Kelly, J.D. 2003. Registration of Flor de Junio Marcela bean cultivar. *Crop Science*. 43:1121-1122
- Chataika, B.Y.E., Bokosi, J.M., Kwapata, M.B., Chirwa, R.M., Mwale, V.M., Mnyenyembe, P., Myers, J.R. 2010. Performance of parental genotypes and inheritance of angular leaf spot (*Phaeosariopsis griseola*) resistance in the common bean (*Phaseolus vulgaris*). *African Journal Biotechnology*. 9(28):4398-4406.
- Ferreira, D.F., Demetrio, C.G.B., Manly, B.F.J., Machado, A.A., Vencovsky. 2006. Statistical model in agriculture: Biometrical methods for evaluating phenotypic stability in plant breeding. *Cerne, Lavras*, 12:373-388
- Gauch, H.G., Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*. 37:311-326
- Gonçalves, J.G., Chiorato, A.F., Kezzy, L.M., Perina, E.F., Farias, F.L., Carbonell, S.A.M. 2010. Estudo da estabilidade fenotípica de feijoeiro com grãos especiais. *Ciência Agrotecnologia*, Lavras, 34:922-931.
- Hassanpanah, D. 2010. Analysis of G×E Interaction by Using the Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) in Potato Cultivars. *International Journal Plant Breeding & Genetics*. 4: 23-29.
- Holland, V., Bjørnstad, Å., Frey, K.J., Gullord, M., Wesenberg, D.M. 2002. Recurrent selection for broad adaptation affects stability of oat. *Euphytica* 126: 265-274,
- Kang, M.S. 2002. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CAB international. 415 p.
- Mohammadi, R., A. Mohammad, A., Sadeghzadeh, D., Amri, A., Nachit, M. 2011. Analysis of Genotype-by-Environment Interaction for Agronomic Traits of Durum Wheat in Iran. *Plant Production Science*. 14:15-21.

- López E., Tosquy, O.H., Villar, B., Becerra, E.N., Ugalde, F.J. 2003. Adaptación, resistencia múltiple a enfermedades y tolerancia a suelos ácidos en genotipos de frijol. *Agronomía Mesoamericana*. 14:151-155.
- Padilla, V.I., Salinas, P.R.A., Acosta G. J.A., Rodríguez C.F.G. 2008. Adaptación y estabilidad del rendimiento en genotipos de frijol azufrado en el sur de Sonora, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31: 225- 233.
- Pereira, H.S., Melo, L.C., Faria, L.C., Díaz, J.L.C., Del Peloso, M.J., Costa, J.G.C., Wendland, A. 2009. Stability and adaptability of carioca common bean genotypes in states of the central South Region of Brazil. *Crop Breeding & Applied Biotechnology*. 9:181-188.
- Rao, A.R., Prabhakaran, V.T. 2005. Use of AMMI in simultaneous selection of genotypes for yield and stability. *Journal Indian Society Agricultural. Statistics*. 59: 76-82.
- Rocha, V.P.C., Cirino, V.M., Destro, D., Fonseca Jr.S.N., Prete, C.E.C. 2010. Adaptabilidade e estabilidade da característica produtividade de grãos dos grupos comerciais carioca e preto de feijão. *Ciências Agrárias, Londrina*, 31:39-54.
- Rosales-Serna, R., Hernandez-Delgado, S.J., Gonzalez-Paz, M., Acosta-Gallegos, J.A. and N. Mayek-Perez. 2005. Genetic relationship and diversity revealed by AFLP markers in Mexican common bean bred cultivars. *Crop Science*. 45:1951-1957
- Santos, J.B., Vello, N.A., P. Ramalho, M.A. 1982. Stability of grain yield and of its basic componentes in beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira Genetica*. 4:761-772.
- Sanni, K.A., Ariyo, O.J., Ojo, D.K., Gregorio, G., Somado, E.A, Sanchez, I., Sie, M., Futakuchi, K., Ogunbayo, S.A., Guei, R.G., Wopereis, M.C.S. 2009. Additive main effects and multiplicative interactions analysis of grain yield performances in rice genotypes across environments. *Asian Journal Plant Science*. 8:48-53.
- Singh, S.P. 2001. Broadening the genetic base in common bean. *Crop Science*. 41:1659-1675
- Vasic, M., Gvozdanovic-Varga, J., Zoric, M., Kraljevic Balalic, M., Cervenski, J. 2010. Analysis of grain size in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by linear and bilinear models. *Genetika*, 42:535-544
- Yan, W. 2002. Singular-value partitioning in biplot analysis of multienvironment trial data. *Agronomy Journal*. 94:990–996.

Submitted August 08, 2011– Accepted September 10, 2011

Revised received September 22, 2011