Rev. Fitotec. Mex. Vol. 23. 277-292. 2000

CRUZAMIENTO NATURAL DE FRIJOL COMÚN EN LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO

NATURAL OUTCROSSING RATES OF COMMON BEAN IN CENTRAL HIGH VALLEYS OF MEXICO

Porfirio Ramírez Vallejo[1], Antonio Reyes Castelán[2], Julio Arturo Estrada Gómez[1], Fernando Castillo González[1], Serafin Cruz Izquierdo[1] y Lucía Barrios Carrada[1]

RESUMEN

Para evaluar el efecto de localidad y fecha de siembra sobre el cruzamiento natural del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), se condujo una serie de experimentos, durante 1993 y 1994 en los Valles Altos de México. Se utilizó como marcador genético el color del hipocótilo. El estudio comprendió la selección de 10 variedades de color de hipocótilo verde y cuatro de color morado; la estimación de cruzamiento, en cuatro experimentos establecidos en Montecillo y Tecámac, México, el 24 de abril y 26 de mayo de 1993 y la evaluación del cruzamiento natural basándose en el número de plántulas de hipocótilo morado en las progenies F_1 de variedades de color verde. Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para localidad, fechas de siembra y variedades, así como en las interacciones de fecha de siembra con posición y variedad, y variedad x localidad x fecha de siembra. El cruzamiento fue significativamente superior en Tecámac (0.54%) respecto a Montecillo, y la fecha del 24 de abril tuvo mayor cruzamiento natural (0.52%) que la del 26 de mayo. Las 10 variedades evaluadas mostraron algún nivel de cruzamiento natural (0.68 a 4.19%), sin embargo, las variedades con valores mayores fueron de hábito indeterminado y de ciclo intermedio a tardío, como el Bayo Mecentral (4.19%), Bayo Gordo (3.53%) y Manzano (3.17%). Características relacionadas con la capacidad de cruzamiento natural de las variedades fueron hábito de crecimiento, precocidad y duración del periodo de floración. La interacción genotipo x ambiente fue de particular importancia, sobre todo con relación a la fecha de siembra.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES

Phaseolus vulgaris L., localidad, fecha de siembra, interacción genotipo x ambiente.

SUMMARY

To assess the influence of location and planting date on the outcrossing rate of dry bean *(Phaseolus vulgaris* L.), a set of experiments was carried out in 1993 and 1994, at two locations of the Central High Valleys of Mexico. Hypocotyl color was used as genetic marker. The study involved the selection of 10 varieties with green hypocotyl and four with purple hypocotyl; the estimation of outcrossing capability, in four identical experiments grown in both Montecillo and Tecámac, México, in April 24 and May 26, in 1993 and the outcrossing rates assessment was based on the number of seedlings with purple hypocotyl found in the F_1 progenies of green hypocotyl varieties. The results showed statistical significance ($p \leq 0.05$) for location, planting date and varieties, as well as for the interactions of planting date with position and varieties, and the varieties x location x planting date interaction. Outcrossing was significatively higher in Tecámac (0.54%) than in Montecillo, and in April 24 was significantly higher (0.52%) than for May 26. The 10 varieties showed some degree of natural crossing; however, indeterminated varieties, such as Bayo Mecentral, Bayo Gordo and Manzano, showed the highest outcrossing rates, 4.19, 3.53, and 3.17%, respectively. Growth habit, and both flowering time and period were the most important varietal traits

[1] Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carret. México-Texcoco. C.P. 56230 Montecillo, Estado de México. Tel. y Fax: 01(595) 2-02-00 Ext. 1590 y 2-0262.

[2] Universidad Autónoma de Guerrero. Abasolo 33, Chilpancingo, Guerrero, México. Tel.: 01(747) 2-5714 y Fax: 01(747) 2-2910

Fecha de Recepción: 19 de Diciembre de 1997.
Fecha de Aprobación: 5 de Junio del 2000.

associated with the capability of natural outcrossing. The genotype x environment interactions were very important, mostly those related with planting date.

ADDITIONAL INDEX WORDS

Phaseolus vulgaris L., location, planting date, genotype x environment interaction.

INTRODUCCIÓN

El frijol (*phaseolus vulgaris* L.), es considerado como una especie fundamentalmente autógama (Allard, 1967). Aunque, Ibarra-Pérez *et al.* (1997) sugieren que el frijol puede no ser predominantemente autofecundado en todas las condiciones y que, en cambio, el sistema de cruzamiento en esta especie puede ser visualizado como una mezcla de sistemas de apareamiento, en los cuales la autofecundación y la polinización cruzada es posible, particularmente cuando es cultivada en ambientes en donde insectos polinizadores, como los abejorros (*Bombus* spp.), están presentes.

El cruzamiento natural en frijol depende de la humedad ambiental, de la temperatura y de los factores ambientales que afectan la población de insectos capaces de polinizar las flores de esta especie (Crispín, 1960-61; Allard, 1967). La influencia de los factores bióticos, asociada con otras características ecológicas de la localidad, hacen que las tasas de cruzamiento natural en frijol común difieran fuertemente dentro y entre zonas. Tasas de 1.2% y 3.7% fueron encontradas por Casas (1958) y Miranda (1971) en los Valles Altos de México, en tanto que, tasas de 78.0 y 85.0% fueron encontradas por Ibarra-Pérez *et al.* (1997) y Wells *et al.* (1988), respectivamente, en California, USA.

Tasas diferenciales de cruzamiento natural han sido observadas por el efecto de la localidad (Crispín,1960-61; Wells *et al.*, 1988; Ibarra-Pérez *et al.*, 1997). Asimismo, la influencia de la fecha de siembra sobre las tasas de cruzamiento ha sido documentada por Crispín (1960-61) quién encontró que el cruzamiento natural es menor en las siembras de invierno que en las de temporal en verano, en diferentes localidades de México; por su parte, Wells *et al.* (1988) encontraron tasas de cruzamiento natural menores en siembras tempranas (18.8%) respecto a las siembras tardías (47.0%), en Irvine, Cal. USA; e Ibarra-Pérez *et al.* (1997) encontraron diferencias, no significativas, entre la fecha de siembra temprana (5.4%) y la tardía (8.4%), en dos localidades de California, USA.

Las tasas de cruzamiento natural son influenciadas fuertemente por las características de los genotipos, como el hábito de crecimiento, ya que el cruzamiento es mayor en genotipos de hábito indeterminado que en los de hábito determinado (Barrons, 1938; Tucker y Hardy, 1975; Brunner y Beaver, 1989); el origen genético de las variedades (Ibarra-Pérez *et al.*, 1997); las características de los órganos reproductivos, como el tamaño de la flor (Crispín, 1960-61; Allard, 1967; Miranda, 1971), la rigidez del pedicelo y la cobertura del estigma por el pedicelo (Miranda, 1971), así como por la coincidencia y duración del periodo de floración (Salinas,1990).

Además de los efectos simples del genotipo y del ambiente, las interacciones entre ambos componentes juegan un papel importante, debido a que las condiciones ambientales tienen un efecto diferencial sobre cada uno de los genotipos, como ha sido demostrado por Wells *et al.* (1988) e Ibarra-Pérez *et al.* (1997).

En la detección del cruzamiento natural han sido empleados diferentes marcadores, como color de semilla y flor (Miranda, 1975; Martin y Adams, 1987; Ibarra-Pérez *et al.*,

1997), hábito de crecimiento (Crispín, 1960-61) y color de hipocótilo (Wells *et al.*, 1988; Ibarra-Perez y Waines, 1991; Ibarra-Pérez *et al.*, 1997). En el hipocótilo, el color está determinado por un par alélico, en el que el color morado es dominante sobre el color verde (Ibarra-Pérez y Waines, 1991). El uso de este marcador es recomendable porque permite manejar un número grande de individuos, e incrementa la precisión de la estimación.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar las tasas de cruzamiento natural, así como el efecto de la localidad y la fecha de siembra sobre la capacidad de cruzamiento, en variedades de frijol común en los Valles Altos de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se establecieron en los campos experimentales de Montecillo, Méx. (19° 29' N y 98° 54' O, con 2250 msnm) y Tecámac, Méx. (19° 43' N y 98° 53' O, con 2260 msnm), localidades en donde prevalecen los climas de transición BSKw(W)(i') y Cwo(W)b(i') y seco BSK' W(w)(i'), respectivamente, con un verano fresco y lluvioso. La precipitación y temperatura registradas en las dos localidades, durante los meses de la estación de crecimiento en 1993, se muestran en la Figura 1 .

El estudio se realizó en tres fases experimentales. En la primera, se seleccionaron los genotipos cuya habilidad de cruzamiento natural sería evaluada en las fases siguientes; en la segunda, la capacidad de cruzamiento natural de los genotipos se probó en dos localidades y dos fechas de siembra bajo condiciones de campo; y en la tercera, se evaluó la tasa de cruzamiento natural con base en el color del hipocótilo de plántulas F_1.

La selección de los genotipos se realizó mediante el color del hipocótilo y pureza varietal en dos experimentos; en 26 variedades comerciales adaptadas a las condiciones regionales (resultados no presentados) se caracterizó el color del hipocótilo

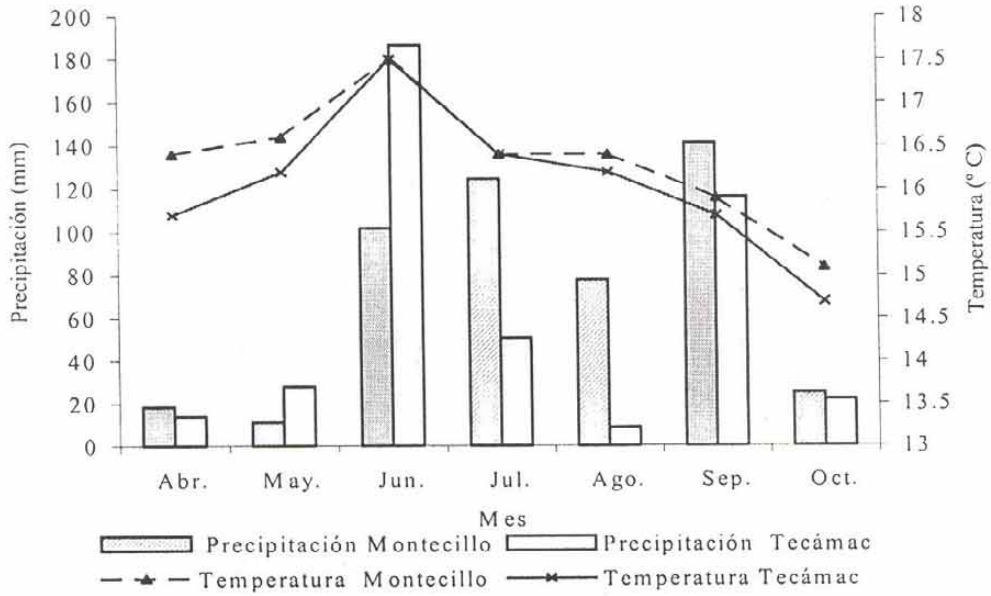


Figura 1. Promedios mensuales de temperatura y precipitación pluvial, en el periodo de abril a octubre en Montecillo y Tecámac, Méx.

de plántulas en estado V3, obtenidas en camas de arena, aproximadamente entre los 13 y 15 días de edad después de la emergencia. Con base en dicha caracterización, 14 cultivares comerciales fueron seleccionados (Cuadro 1). Diez de las catorce variedades, que mostraron hipocótilo verde, fueron utilizadas para ser contaminadas por cuatro variedades de hipocótilo morado. El cruzamiento natural se estimó con base en el número de plántulas con hipocótilo morado en progenies F_1 de variedades de hipocótilo verde sometidas a la contaminación del polen de las variedades de hipocótilo morado.

La capacidad de cruzamiento natural en condiciones de campo de las variedades de hipocótilo verde se probó en cuatro experimentos, establecidos en dos localidades y dos fechas de siembra. En todos los casos, las 10 variedades de hipocótilo verde se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Las variedades con hipocótilo verde se establecieron en parcelas experimentales de tres surcos de cinco metros de longitud. La distancia entre surcos y plantas fue de 80 y 10 cm, respectivamente. Los experimentos fueron establecidos el 24 de abril y el 26 de mayo de 1993, en ambas localidades.

Con el objeto de incrementar las posibilidades de contaminación, entre cada parcela de las variedades de hipocótilo verde se colocaron dos surcos en los que las cuatro variedades de hipocótilo morado fueron distribuidas aleatoriamente; en este caso, cada una de las variedades ocupó una longitud de 2.5 m de longitud de uno de los surcos contaminantes. Adicionalmente, para garantizar un alto grado de contaminación, las cuatro variedades de hipocótilo morado fueron

Cuadro 1. Características de catorce variedades de frijol común empleadas para evaluar las tasas de cruzamiento natural en Montecillo y Tecámac, Méx. 1993.

Variedad	Hábito[1]	Ciclo (días)	Tipo y color de semilla	Color de flor	Color de hipocótilo[2]
Bayo Río Grande	I	118	Bayo: Amarillo-medio	blanca	verde
Bayomex	D	105	Bayo: Amarillo-medio	blanca	verde
Flor de Durazno	D	105	Flor de Mayo: rosa-moteado	rosa	verde
Bayo Mecentral	I	108	Bayo: crema-venas	blanca	verde
Flor de Mayo Bajío	I	107	Flor de Mayo: crema-rosado	blanca	verde
CIAT-2	I	120	Bayo: azufrado	blanca	verde
Bayo Gordo	I	115	Bayo: amarillo-opaco	blanca	verde
Flor de Junio	I	130	Flor de Mayo: crema-rosado	blanca	verde
Manzano	I	110	Bayo: rosado-café	blanca	verde
Cacahuate 72	D	95	Cacahuate: Pinto-rosado	rosa	verde
Negro Perla	D	110	Negro	morada	morado
Jamapa	I	118	Negro	morada	morado
Negro Puebla	I	125	Negro	morada	morado
Negro 150	I	123	Negro	morada	morado

Fuente: Programa de frijol CEVAMEX-INIFAP.
[1] I, indeterminado; D, determinado.
[2] Color de hipocótilo caracterizado en la primera fase.

sembradas en los bordos laterales y las cabeceras de los experimentos, procurando que en todos los casos los genotipos más tardíos quedaran localizados en las áreas más externas y los precoces en las más internas

Los cuatro experimentos se fertilizaron al momento de la siembra con la dosis 40-40-00. La densidad de población de plantas fue de 125,000 plantas por hectárea, aproximadamente. En promedio se aplicaron cinco riegos a los experimentos establecidos en la primera fecha de siembra y sólo tres a los experimentos establecidos en la segunda fecha. El control de plagas se realizó con Tamarón y Metasistox, en la dosis de un litro por hectárea para combatir la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), la conchuela (*Epilachna varivestis*) de frijol y la diabrótica (*Diabrotica balteata*). En los experimentos localizados en Montecillo fue necesario corregir deficiencias de elementos menores, con la aplicación de Nitrofoska 5-15-5-0.2 en forma foliar, en la dosis de 4 Lha^{-1}, en dos ocasiones.

Las variables registradas en estos experimentos fueron: número de días a la primera flor, a la última flor y a la madurez fisiológica, así como variables asociadas con el tamaño de la flor. Adicionalmente, se calculó el período de floración, con la diferencia entre los días a la primera y última flor.

Finalmente, la evaluación de la contaminación ocurrida en campo se realizó en el área de trabajo de la Especialidad de Producción de Semillas del Colegio de Postgraduados, ubicada en Montecillo, México. Los experimentos se condujeron en camas de arena cubiertas con polietileno, durante el mes de febrero de 1994. Los tratamientos que resultaron de la combinación de los niveles de los factores repetición en campo (3), posición (lateral y central), localidad (Montecillo y Tecámac) y fecha de siembra (24 de abril y 26 de mayo) se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, en un arreglo de parcelas divididas. En este experimento la unidad experimental consistió de una hilera de 2.5 m de longitud en la que se sembraron semillas individuales F_1 a una distancia de 2.5 cm para obtener 100 plántulas por parcela. Las semillas provinieron de una muestra aleatoria de 7 200 semillas por variedad. Las plántulas se extrajeron 15 días después de la emergencia, y se lavaron con agua para eliminar la arena y facilitar la calificación del color del hipocótilo. Las plántulas con hipocótilo verde se consideraron como autofecundaciones y las de hipocótilo morado como producto de cruzamiento. Con estos datos se calculó el porcentaje de contaminación o cruzamiento natural, que fueron transformados con la función $(\text{arcoseno})^{1/2}$ con el objeto de normalizar la variable. La información se procesó y se analizó mediante el paquete de análisis estadístico SAS. Los análisis de variación en cada una de las etapas se realizaron conforme los modelos descritos. La discriminación de medias se realizó mediante la prueba de rango múltiple y de la Diferencia Mínima Significativa (DMS), en las variables con significancia estadística. En el caso de las variables transformadas la discriminación de medias se hizo con los valores transformados, sin embargo, se presentan los porcentajes observados, para facilitar la interpretación de la información.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias entre localidades, fechas de siembra y variedades, además de las interacciones posición x fecha de siembra, variedad x fecha de siembra y variedad x localidad x fecha de siembra mostraron significancia estadística (Cuadro 3).

La posición del surco afectó el porcentaje de cruzamiento natural (Figura 2), ya que se observó mayor contaminación en la posición lateral (30%) que en los surcos centrales, aunque las diferencias observadas no resultaron significativas estadísticamente. La tendencia mostrada por el efecto de la posición se explicaría si se toma en cuenta la distancia entre los dos grupos de variedades, ya que los surcos laterales estuvieron ubicados a 80 cm de las variedades contaminantes de hipocótilo morado, mientras que el surco central estuvo a 1.60 cm. La distribución y el aislamiento consecuente debido a la ubicación explican los resultados obtenidos; sobre todo, si se toma en cuenta que la polinización cruzada en esta especie es principalmente entomófila; estos resultados concuerdan con las observaciones de Miranda (1971) y Salinas (1990), quienes encontraron que el porcentaje de cruzamiento natural es inversamente proporcional a las distancias que separan a las poblaciones durante su desarrollo.

La localidad de siembra afectó significativamente al cruzamiento natural de la semilla (Figura 3). En este caso, las condiciones ambientales prevalecientes en Tecámac propiciaron el cruzamiento natural, posiblemente como consecuencia de la menor precipitación (Figura 1), lo que pudo haber favorecido la actividad de los insectos. En Montecillo, los experimentos estuvieron ubicados a 50 m de un apiario; sin embargo, los porcentajes de cruzamiento natural fueron significativamente menores que los de Tecámac. Estas observaciones podrían indicar que las condiciones meteorológicas de

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancias estadísticas del análisis de varianza[1] para el porcentaje de cruzamiento natural en frijol en Montecillo y Tecámac, Méx., en 1993.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio
Repeticiones	2	323.95
Posiciones (P)	1	247.54
Error A	2	116.46
Localidad (L)	1	395.52**
Fecha de Siembra (FS)	1	172.84*
L x FS	1	75.62
P x L	1	33.76
P x FS	1	188.75*
P x L x FS	1	27.27
Error B	60	31.76
Variedad (V)	9	567.70**
V x P	9	10.40
V x L	9	27.14
V x FS	9	66.25**
V x L x FS	9	58.44*
V x P x L	9	33.27
V x P x FS	9	16.45
V x P x L x FS	9	28.66
Error C	576	24.74

* Significativo ($p<0.05$).

**Significativo ($p<0.01$).

[1] Datos de porcentaje transformados con la función $(\text{arcoseno})^{1/2}$

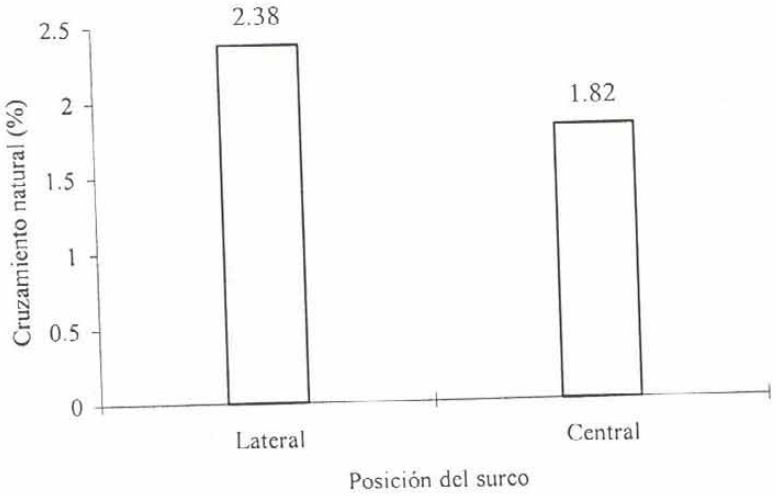


Figura 2. Cruzamiento natural (%) en frijol, en semilla proveniente de dos posiciones de surcos en la parcela, en los Valles Altos de México.1993.

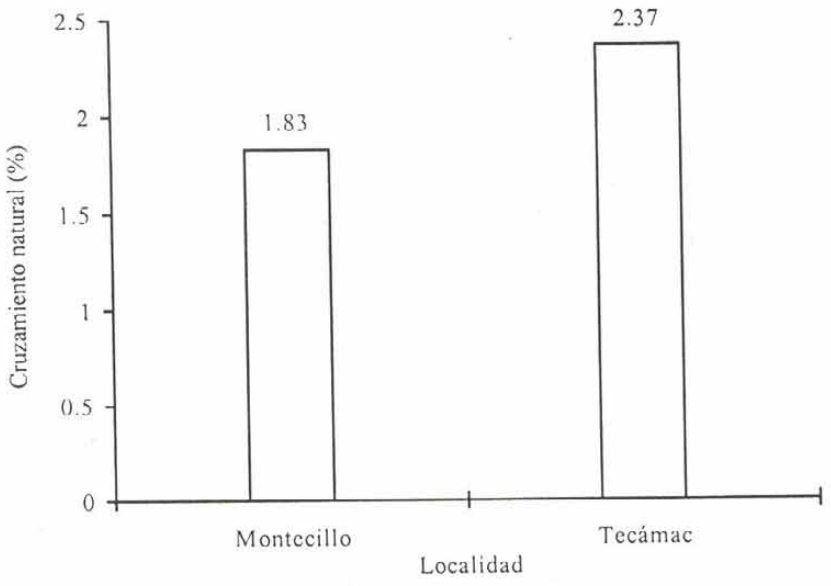


Figura 3. Cruzamiento natural (%) en frijol común, en dos localidades de los Valles Altos de México. 1993.

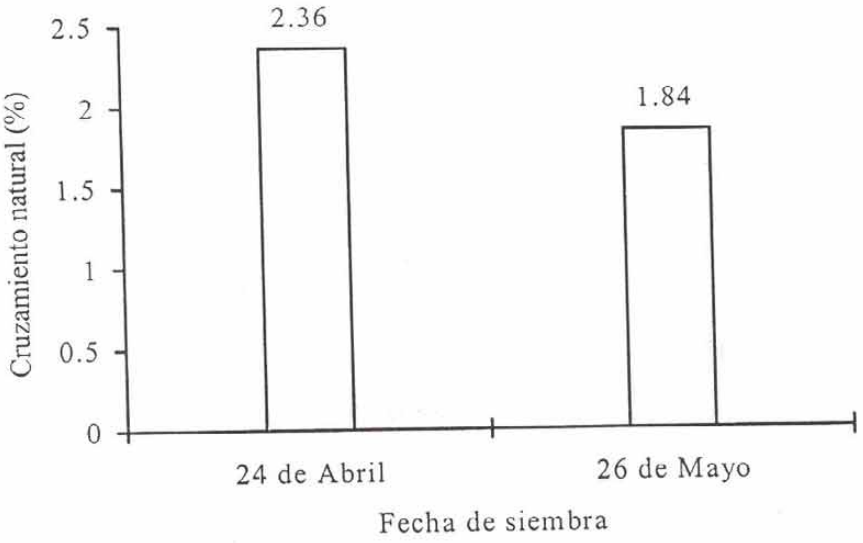


Figura 4. Cruzamiento natural (%) en frijol común, en dos fechas de siembra, en los Valles Altos de México 1993.

Montecillo inhibieron en forma importante la actividad entomófila, que las abejas (*Apis mellifera*) no fueron los principales polinizadores del frijol y que otras especies de insectos podrían ser de mayor importancia en la ocurrencia del fenómeno.

La fecha de siembra afectó significativamente las tasas de cruzamiento natural (Figura 4). Así, el mayor porcentaje de cruzamiento natural ocurrió en la fecha de siembra temprana (24 de abril). Estos resultados difieren de los observados por Wells *et al.* (1988), quienes encontraron tasas de cruzamiento mayores en las fechas tardías que en las tempranas, y de los obtenidos por Ibarra-Perez *et al.* (1997), quienes no encontraron significancia entre fechas de siembra. Las diferencias en cruzamiento pudieron ser debidas a la respuesta diferencial de las variedades al efecto de la fecha de siembra sobre su período de floración, ya que en la primera fecha de siembra el período de floración fue diez días más largo que en la segunda, lo que pudo haber incrementado las posibilidades de contaminación en campo.

Adicionalmente, la floración de las variedades de frijol sembradas en abril ocurrió a mediados de junio y principios de julio, época en que se estableció el temporal, y por tal razón, la población de flores de otros cultivos o de plantas silvestres con las que pudiera competir el frijol en la preferencia de los insectos fue reducida; en contraste, la floración en la segunda fecha de siembra coincidió con la de otras especies, como el girasol (*Helianthus annuus* L.) en Montecillo y la dalia (*Dahlia* sp.) en Tecámac, que pudieron haber capturado la preferencia de los insectos. La interacción localidad x fecha de siembra no resultó estadísticamente significativa, lo que podría ser el resultado de la relación de ambos factores con los componentes ambientales que determinan las poblaciones de insectos prevalecientes en la estación de crecimiento en un lugar determinado, resultados similares fueron reportados por Wells *et al.* (1988) e Ibarra-Pérez *et al.* (1997).

La distancia a la fuente de contaminación puede ser un elemento adicional que contribuye a favorecer el cruzamiento natural (Miranda, 1971; Salinas, 1990). Para evaluar este efecto, se agregó en la evaluación el factor posición, que describe la ubicación relativa en la parcela de los surcos que dieron origen a la semilla. Las diferencias en posición no fueron estadísticamente significativas, sin embargo, la interacción posición x fecha sí resultó significativa ($p \leq 0.05$). Este comportamiento pudo ser el resultado de una mayor tasa de cruzamiento natural en los surcos laterales que en los centrales en ambas fechas de siembra (Figura 5); sin embargo, la diferencia en las tasas de cruzamiento debido a las posiciones fueron mayores en la fecha tardía (26 de mayo) que en la fecha temprana (24 de abril), aunque las mayores tasas de cruzamiento ocurrieron para ambas posiciones en la fecha temprana.

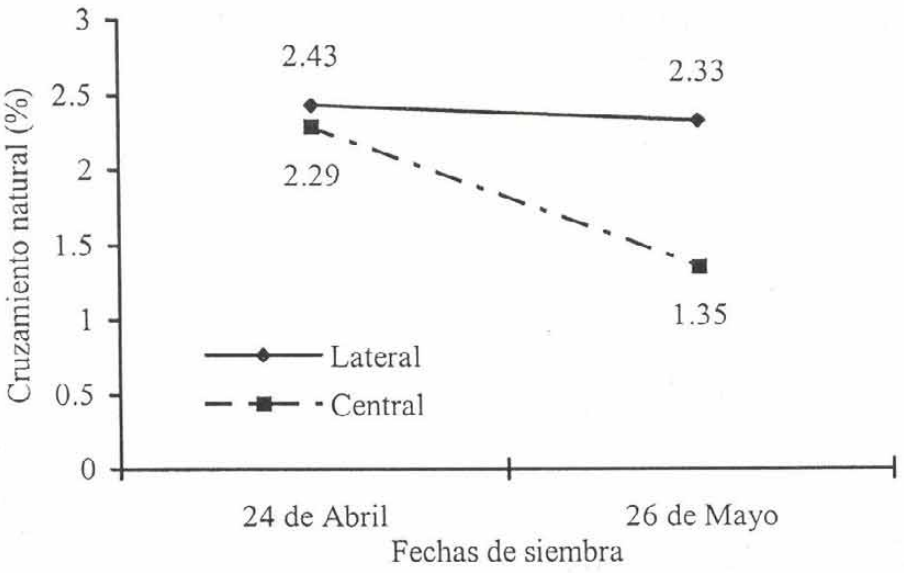


Figura 5. Cruzamiento natural (%) en frijol común, en dos fechas y dos posiciones de surco, en los Valles Altos de México 1993.

Las variedades de hipocótilo verde mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la tasa de cruzamiento (Cuadro 3), aunque en todas ellas se observó algún grado de cruzamiento. La variedad que mostró mayor cruzamiento fue Bayo Mecentral, que posee hábito indeterminado y es de ciclo intermedio; en tanto, que la variedad Cacahuate 72 de hábito determinado y ciclo corto mostró el menor cruzamiento natural. Otras variedades con altos porcentajes de cruzamiento natural fueron Bayo Gordo (2.53 %) y Manzano (3.17 %).

Variedades con niveles de cruzamiento natural intermedio fueron Bayo Río Grande (2.62 %), Flor de Junio (2.10 %), CIAT-2 (1.63 %) y Bayomex (1.33 %). Flor de Mayo Bajío y Flor de Durazno tuvieron porcentajes de contaminación cercanos al 1 %.

Las variedades de hábito indeterminado tuvieron tasas de cruzamiento mayores (2.6%) que las de hábito determinado (0.9%), de la misma manera el intervalo de variación en la tasa de cruzamiento natural en las variedades indeterminadas fue de 1.02 a 4.19% y en el caso de las variedades deteminadas estuvo entre 0.68 a 1.33%. Este resultado podría ser consecuencia de la forma ascendente en que se presenta la floración en las variedades de crecimiento indeterminado, que se inicia en la parte inferior de la planta y continúa hacia arriba sin interrumpir el crecimiento de la guía al llegar a la fase reproductiva (Kohashi, 1990), fenómeno que puede favorecer la exposición de un mayor número de flores a la actividad de los insectos por períodos más largos. En cambio, en las variedades de hábito determinado, la floración progresa de la parte superior del tallo o de las ramas superiores hacia abajo, con la interrupción del crecimiento; por lo que, la probabilidad de que ocurra polinización por insectos es menor. Con base en estos resultados, es posible concluir que el hábito de crecimiento influyó fuertemente sobre la habilidad de cruzamiento natural en frijol, observándose una notable superioridad de las variedades de hábito indeterminado sobre las de determinado. Adicionalmente, es evidente que existe una variación significativa, principalmente, entre las variedades de hábito indeterminado (1.02 a 4.19 %), lo que plantea la necesidad de caracterizar cada genotipo en su habilidad de cruzamiento natural, con fines prácticos de mejoramiento y producción de semillas. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Barrons (1939), Tucker y Hardy (1975) y Brunner y Beaver (1989). Desde el punto de vista del mejoramiento genético la posibilidad de obtener nuevas combinaciones en forma natural se incrementaría en variedades con tasas de polinización abierta mayores, al mismo tiempo que sugiere la necesidad de mayores cuidados en la multiplicación de germoplasma elite y básico por las posibilidades de contaminación natural, como lo señala Miranda (1971); al mismo tiempo, la existencia de variabilidad entre variedades por cruzamiento natural ofrece ventajas para el desarrollo de nuevos sistemas de mejoramiento en esta especie, como lo han sugerido Wells *et al.* (1988), en el sentido de que la selección recurrente podría ser usada para desarrollar poblaciones mejoradas de frijol. Si fuera posible encontrar genotipos y ambientes que permitieran el suficiente cruzamiento natural para preservar la variabilidad genética bajo selección continua.

La precocidad también afectó el cruzamiento natural entre variedades de frijol, ya que las variedades de ciclo intermedio y tardío fueron más susceptibles a la contaminación que las variedades precoces; principalmente porque el periodo de floración es más prolongado en las primeras que en las últimas. A este comportamiento pudieron haber contribuido las diferencias en el inicio de la floración de las variedades más precoces de

Cuadro 3. Cruzamiento natural (%) en diez variedades de frijol, en los Valles Altos de México. 1993.

Variedad	Hábito *	Cruzamiento natural (%)
Bayo Mecentral	I	4.19a
Bayo Gordo	I	3.53ab
Manzano	I	3.17b
Bayo Río Grande	I	2.62bc
Flor de Junio	I	2.10cd
CIAT-2	I	1.63de
Flor de Mayo Bajío	I	1.02f
Bayomex	D	1.33ef
Flor de Durazno	D	0.73f
Cacahuate	D	0.68f

Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes con base en la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS), $p \leq 0.05$.

* I= Indeterminado; D= Determinado

los dos grupos de variedades de frijol (cuatro días), lo que pudo influir para que las variedades precoces registraran menor cruzamiento natural, pues la asincronía en la floración con los genotipos portadores del carácter hipocótilo morado acortó el tiempo de exposición a la actividad entomófila en este tipo de variedades.

En este estudio se encontró una relación inversa entre el tamaño de flor y el cruzamiento natural (datos no presentados). Las variedades con tasas de cruzamiento natural altas, exhibieron flores de tamaño intermedio y pequeño; mientras que, las variedades con menor contaminación tuvieron flores de mayor tamaño. Adicionalmente, este comportamiento podría estar relacionado con la mayor precocidad de las variedades de tamaño de flor mayor. En este sentido, se encontraron correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) entre el porcentaje de cruzamiento natural con las características de la flor longitud de estandarte ($r=-0.48$), anchura de alas ($r=-0.55$), peso fresco ($r=-0.36$) y peso seco ($r=-0.40$). Estos resultados indican la existencia de una relación inversa entre el tamaño de la flor y la tasa de cruzamiento natural, de esta manera los resultados concuerdan con lo señalado por Webster *et al.* (1977), quienes indican que el control genético de las tasas de cruzamiento natural pudiera ser debido a las características asociadas con las estructuras florales.

Además de las relaciones de las tasas de cruzamiento con las características florales, este estudio mostró que el color de flor estuvo asociado con el cruzamiento natural, ya que las variedades de flores blancas presentaron frecuencias de cruzamiento más altas que las de flor rosa.

La significancia ($p \leq 0.01$) de la interacción variedades x fecha de siembra denota la respuesta diferencial de los genotipos a la influencia de los ambientes imperantes durante la estación de crecimiento, como resultado de diferentes fechas de siembra (Figura 6). De esta manera, se pudo observar que aún cuando en promedio las mayores tasas de cruzamiento se dieron en la fecha temprana (24 de abril), en algunas variedades se presentaron las mayores tasas de cruzamiento

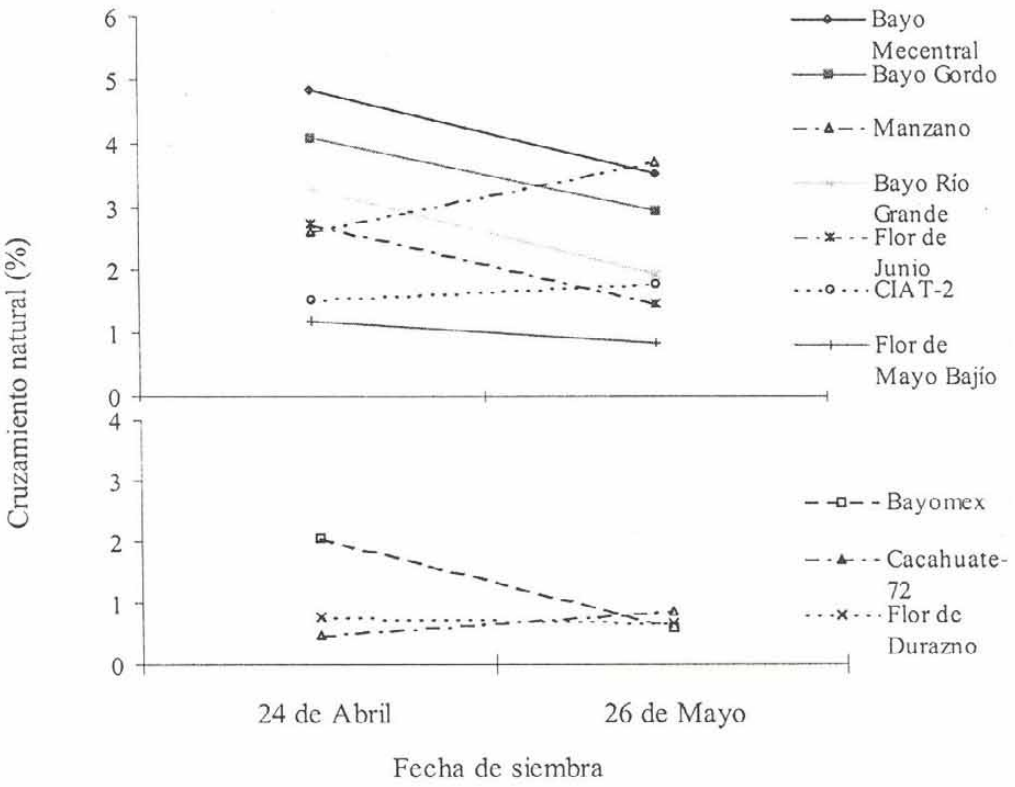


Figura 6. Cruzamiento natural (%) en diez variedades comerciales de frijol común, en dos fechas de siembra, en los Valles Altos de México. 1993.

en la fecha tardía (26 de mayo), como en Manzano (3.73 *vs* 2.60 %), CIAT-2 (1.76 *vs* 1.51 %) y Cacahuate 72 (0.86 *vs* 0.50).

En general, las variedades de hábito indeterminado, con excepción de Manzano, tuvieron sus mayores tasas de cruzamiento en la fecha de siembra del 24 de abril. En el caso de las variedades de hábito determinado no se observó una respuesta única, como cabría esperar dada la precocidad de estas variedades, en cambio, se tuvo una respuesta diferencial, ya que mientras Cacahuate 72 tuvo la mayor tasa en la fecha de siembra del 26 de mayo, Flor de Durazno y Bayomex la tuvieron el 24 de abril. Estos resultados podrían tener explicación en el mayor periodo de floración de las variedades indeterminadas, en tanto que las diferencias en las varie-

dades precoces podrían atribuirse a diferencias en el color y tamaño de las flores.

La significancia ($p \leq 0.05$) de la interacción variedad x localidad x fecha de siembra mostró que además de las diferencias dentro de cada uno de los factores, la interacción entre ellos es también de importancia; y que la interacción genotipo x ambiente puede ser un factor determinante de las tasas de cruzamiento natural, ya que como en el caso de la interacción variedad x fecha de siembra, las condiciones ambientales tienen un efecto diferencial sobre cada uno de los genotipos, como ha sido señalado por Wells *et al.* (1988) e Ibarra-Pérez *et al.* (1997). En este caso, el ambiente, que es definido por la localidad y la fecha de siembra, puede ser crítico en la determinación del porcentaje de cruzamiento, que alcanza valores específicos para cada genotipo o variedad, sobre todo porque no se observa una tendencia o comportamiento único, posiblemente como resultado del origen diverso y grado de adaptación del material genético (Mackie y Smith, 1935; Barrons, 1939; Brunner y Beaver, 1989). Como un ejemplo de la importancia de esta interacción, en Bayo Mecentral se tuvieron tasas de cruzamiento cercanas a 5.0% en tres de las cuatro condiciones , en tanto que en la fecha tardía de Montecillo (26 de mayo) esta tasa se redujo a 2.0% , que equivale a una reducción del cruzamiento natural potencial del orden del 60%; en el caso del Manzano, la mayor tasa de cruzamiento se presentó en Montecillo en la fecha tardía (26 de mayo); finalmente, en el caso de la variedad de hábito determinado Bayomex, en tres de las cuatro condiciones experimentales tuvo tasas de cruzamiento muy similares, ente 0.93 y 0.98%, y en la condición de Tecámac en la fecha de siembra más temprana alcanzó hasta 3.16%, cantidad que representa aproximadamente 3 veces la tasa de cruzamiento obtenido en otras localidades (Cuadro 4).

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la utilidad de conocer con mayor precisión las tasas de cruzamiento natural de los genotipos de importancia comercial, ya sea con fines de producción comercial o de mejoramiento genético. En la producción de semillas, la definición de las mejores áreas de producción deberían considerar localidades y fechas de siembra en que las tasas de cruzamiento fueran mínimas, así como tomar en cuenta los porcentajes de cruzamiento para determinar las distancias mínimas acordes con la habilidad de cruzamiento de cada genotipo. En el caso del mejoramiento genético, la utilización de híbridos espontáneos, puede representar una fuente adicional de variación, y además representar la posibilidad de utilizar sistemas de mejoramiento más eficientes, basados en el aprovechamiento de tasas de cruzamiento natural mayores, lo cual sería posible con la identificación de genotipos, localidades y fechas de siembra apropiados.

CONCLUSIONES

La localidad y la fecha de siembra influyeron significativamente en la tasa de cruzamiento de las 10 variedades de frijol evaluadas. En Tecámac fue mayor (2.27%) que en Montecillo (1.83%) y en las siembras del 24 de abril hubo mayor cruzamiento (2.36%) que en las del 26 de mayo (1.84%).

Las variedades de hábito de crecimiento indeterminado que presentaron los porcentajes de cruzamiento mayor fueron Bayo Mecentral (4.15%) y Bayo Gordo (3.53%). Entre las variedades de hábito determinado, Bayomex presentó el mayor porcentaje de cruzamiento (1.33%).

El tamaño de flor fue inverso a la capacidad de cruzamiento y las variedades de flo-

Cuadro 4. Cruzamiento natural (%) en diez variedades de frijol, en dos localidades y dos fechas de siembra, en los Valles Altos de México, en 1993.

Variedad	Montecillo		Diferencia entre fechas en Montecillo	Tecamac		Diferencia entre fechas en Tecámac
	24 abril	26 mayo		24 abril	26 mayo	
Bayo Mecentral	4.93 a	2.02 b	2.91*	4.76 a	5.06 a	0.30
Manzano	1.93 b	4.38 a	-2.45*	3.27 a	3.08 a	0.19
Bayo Gordo	3.93 a	2.29 b	1.64	4.26 a	3.65 a	0.61
Flor de Junio	1.96 a	1.24 a	0.72	3.52 a	1.69 b	1.83*
Bayo Río Grande	3.13 a	1.42 b	1.71*	3.48 a	2.45 a	1.03
Bayomex	0.96 a	0.93 a	0.03	3.16 a	0.98 b	2.18*
CIAT-2	1.45 a	2.03 a	-0.58	1.56 a	1.49 a	0.07
Flor de Mayo Bajío	1.77 a	0.64 a	1.13	0.60 a	1.06 a	-0.46
Cacahuate 72	0.42 a	0.29 a	0.13	0.58 a	1.42 a	-0.84
Flor de Durazno	1.34 a	0.17 b	1.17*	0.24 a	1.17 a	-0.93

Promedios de fechas dentro de cada localidad con la misma letra en hileras no son significativamente diferentes, con base en la Diferencia Mínima Significativa ($p \leq 0.05$)

* Significativo ($p \leq 0.05$)

res blancas presentaron mayor frecuencia de cruzamiento que las de flores color rosa.

La significancia de las interacciones de la fecha de siembra con posición (respecto a la fuente de contaminación), variedad y variedad x localidad x fecha de siembra ponen de manifiesto la importancia de la interacción genotipo x ambiente en la determinación de las tasas de cruzamiento. Así, tasas de cruzamiento mayores a 4.0% se observaron en Bayo Mecentral en la fecha temprana en Montecillo y en ambas fechas en Tecámac, en Manzano en la fecha de siembra tardía en Montecillo y en Bayo Gordo en la fecha temprana en Tecámac.

El color del hipocótilo puede emplearse como característica cualitativa confiable y práctica para discriminar variedades o determinar contaminaciones genéticas.

Los resultados de esta investigación muestran que en poblaciones de frijol común el sistema de apareamiento puede involucrar un grado de alogamia, el cual dependerá de las características morfológicas y fenológicas de los genotipos, así como del ambiente en que se reproducen que propicia el desarrollo de insectos polinizadores. El conocimiento de la capacidad de cruzamiento puede ser de utilidad práctica para los programas de mejoramiento y producción de semillas.

BIBLIOGRAFÍA

Allard, R.W. 1967. Principios de la mejora genética de las plantas. Trad.1a Ed. Americana J. L. Montoya. Ed. Omega, Barcelona. 498 p.

Barrons, K.C. 1938. Natural outcrossing at different degrees of isolation. Proc. Am. Soc. Hort. Sci. 36:637-640.

Brunner, B.R., and J. S. Beaver. 1989. Estimation of outcrossing of the common bean in Puerto Rico. Hortic. Sci. 24:669-671.

Casas D., E. 1958. Herencia de tres características morfológicas en frijol y su relación con la obtención de variedades puras. Tesis Profesional. ENA Chapingo, México. 45 p.

CIAT. 1983. Metodología para obtener semilla de buena calidad. Serie 07SSe(1)83. Cali, Colombia. 198 p.

Crispín M., A. 1960-61. Cruzamiento natural en el frijol. Agric. Téc. Méx.. 11: 38-39.

Ibarra-Pérez, F., and G. Waines. 1991. Natural outcrossing rates of bean cultivars. Bean Improvement Cooperative 34:122-126.

Ibarra-Pérez, F. B. Edhaie, and J. G. Waines. 1997. Estimation of outcrossing rate in common bean. Crop. Sci. 37:60-65.

Kohashi S., J. 1990. Aspectos de la morfología y fisiología del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su relación con el rendimiento. Centro de Botánica. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 44 p.

Lépiz I., R. 1981. Notas de campo que se deben tomar en experimentos con frijol. INIA. Programa de Frijol. Mimeografiado. 10 p.

Mackie, W.W., and F.L. Smith. 1935. Evidence of field hybridization in beans. J. Am. Soc. Agron. 27: 903-909.

Martin, G.B., and M.W. Adams. 1987. Landraces of *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae) in North Malawi. II. Generation and maintenance of variability. Econ. Bot. 41:204-215.

Miranda C., S. 1971. Cruzamiento natural en frijol. Agric. Téc. Méx. 3:48-52.

Salinas G., G. E. 1990. Cruzamiento natural e inducido en frijol. Resúmenes del XIII Congreso Nacional de Fitogenética. SOMEFI. Cd. Juárez, Chih. México. p: 336.

Tucker, C.L., and J. Harding. 1975. Outcrossing in common bean, *Phaseolus vulgaris* L. J. Am. Soc. Hort. Sci. 100:283-285.

Wells, W.C., W.H. Isom , and J.C. Waines 1988.
Outcrossing rates of six common bean lines.
Crop Sci. 28:177-178.