

Diferencias fenológicas, morfológicas y de componentes del rendimiento entre una forma silvestre y domesticada de frijol común

Marisol Jazmín Flores de la Cruz¹

Antonio García Esteva^{1§}

José Rodolfo García Nava¹

Josué Kohashi Shibata¹

Ma. Carmen Ybarra Moncada²

¹Postgrado en Botánica-Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 56230. Tel. 01(595) 9520200, ext. 1318. (mjazminf@gmail.com; esteva@colpos.mx; jkohashi@colpos.mx).

²Departamento de Ingeniería Agroindustrial-Universidad Autónoma Chapingo, Carretera Méx-Tex km 38.5, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 01(595) 9521500, ext. 1687. (ycydrive@gmail.com).

§Autor para correspondencia: garcianr@colpos.mx.

Resumen

En 2014 se cultivaron en invernadero dos formas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), una silvestre y otra domesticada, ambas de hábito de crecimiento indeterminado tipo IV, trepador. El cultivo se realizó en hidroponía permitiendo la máxima expresión de su potencial genético. La forma silvestre y la domesticada de *P. vulgaris* son importante reservorio de genes para el fitomejoramiento. El objetivo fue realizar una comparación mutua de caracteres fenológicos, morfológicos y de los componentes del rendimiento, así como de algunas variables fisiológicas como duración del área foliar, tasa de asimilación neta, índice de llenado de la vaina e índice de cosecha. La forma silvestre presenta un ciclo de cultivo más largo que la domesticada y un mayor número de vainas desde la etapa de llenado de la vaina hasta la de madurez de cosecha y en esta última un mayor número de semillas por planta, aunque las semillas de un menor tamaño y peso individual; asimismo, el porcentaje de germinación fue similar en ambas formas sin necesidad de escarificar la semilla. En la forma silvestre, la producción total de materia seca por planta y la duración del área foliar son mayores, esta última característica debido a que su follaje permanece funcional más tiempo en comparación con la domesticada. La tasa de asimilación neta es mayor en la domesticada, lo cual indica su precocidad. El índice de cosecha tradicional y modificado (incluyendo y excluyendo la raíz en ambos casos) es mayor en la forma domesticada debido a la selección bajo domesticación.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., crecimiento indeterminado, germoplasma, peso de semilla por planta.

Recibido: enero de 2018

Aceptado: febrero de 2018

Introducción

La domesticación de las plantas está relacionada con el afán de satisfacer las necesidades del hombre, las cuales según Hill (1952) son de alimentación, vestido, abrigo, entre otras. El frijol común, durante un periodo de por lo menos 7 000 a 8 000 años que comprende la fase de domesticación inicial y subsecuente evolución bajo cultivo, ha evolucionado de su forma silvestre con un tipo de guía hasta uno de mata, llegando a ser en el mundo, una leguminosa domesticada muy importante para la alimentación. Dicha evolución ha sido el resultado de la mutación, selección, migración y deriva genética, actuando en la materia prima proporcionada por el *P. vulgaris* (Gepts y Debouck, 1991).

Los centros de domesticación que se han determinado para el frijol común son el Mesoamericano y el Andino, siendo un caso de domesticación múltiple e independiente (Kaplan y Lynch, 1999). Se ha propuesto la existencia de un tercer centro, sin embargo, las evidencias actuales no permiten justificarlo (Hernández *et al.*, 2013). México forma parte del centro de domesticación Mesoamericano contando con una gran diversidad de *Phaseolus* que va desde silvestres, criollos y mejorados (Peña *et al.*, 2012). Estrictamente, se consideraría que las plantas de *P. vulgaris* en su forma silvestre crecerían vigorosamente en una vegetación no perturbada; sin embargo, en un futuro podrían encontrarse con mayor frecuencia en áreas secundarias (Delgado *et al.*, 1988).

En los restos arqueológicos de *P. vulgaris* sólo se han encontrado formas de frijol completamente domesticado, pero no se tiene evidencia de la secuencia de domesticación (Gepts y Debouck, 1991). Se hacen deducciones sobre el aspecto del frijol común silvestre con base a lo observado actualmente; los restos arqueológicos muestran un aumento de tamaño de la semilla en la forma domesticada (aunque también el tamaño de la semilla aumenta a medida que avanza hacia el sur del rango de la distribución de la forma silvestre, dependiendo del centro de domesticación en el que se encuentre) (Toro *et al.*, 1990). El frijol común es predominantemente autógamo (Gepts, 1998).

La dehiscencia en las vainas de la forma silvestre es clave como principal característica (Schwanitz, 1966; Miranda, 1979; Delgado *et al.*, 1988; Toro *et al.*, 1990; Gepts y Debouck, 1991) e incluso Smartt (1988) la considera explosiva y Gentry (1969) al describir la dehiscencia, señala que las semillas son proyectadas violentamente. Según Gepts y Debouck (1991) la dehiscencia se presenta en el frijol domesticado cuando es destinado para grano pero no para ejote. El hábito de crecimiento del frijol silvestre *in situ* comúnmente es indeterminado trepador (Miranda, 1979; Delgado *et al.*, 1988; Gepts y Debouck, 1991) y para el domesticado puede ser de crecimiento indeterminado trepador o también determinado (Gepts y Debouck, 1991).

Las hojas en el frijol silvestre son pequeñas (Gepts y Debouck, 1991); los folíolos pueden medir de 3.2 a 9 cm de longitud y de 3 a 7 cm de ancho (Delgado *et al.*, 1988), mientras que en el domesticado pueden ser de pequeños a grandes (Gepts y Debouck, 1991). Las inflorescencias en el frijol silvestre casi siempre son laterales y en el domesticado pueden ser laterales o terminales, dependiendo del hábito de crecimiento (Gepts y Debouck, 1991). El estandarte de las flores en el frijol silvestre puede estar curvado hacia atrás y en el domesticado es usualmente erecto (Gepts y Debouck, 1991). García-Hernández *et al.* (1999) registraron que el color lila y morado de la flor son los más frecuentes para frijol silvestre; según Gepts y Debouck (1991) son raramente blancas, mientras que en el domesticado el color blanco es el predominante.

La forma domesticada de *P. vulgaris* L. muestra valores mayores a la silvestre en longitud y anchura de vaina (Lépiz *et al.*, 2010), en el frijol silvestre son pequeñas midiendo de 6 a 8 cm de largo con 5 a 8 óvulos, a diferencia del domesticado el cual pueden medir de 4 hasta 30 cm y con 2 a 9 óvulos (Gepts y Debouck, 1991); asimismo, en el domesticado es mayor la longitud, anchura y espesor de semilla (Vázquez y Cárdenas, 1992; Lépiz *et al.*, 2010) y mayor el peso de 100 semillas (Vázquez y Cárdenas, 1992; Guzmán-Maldonado *et al.*, 2003; Lépiz *et al.*, 2010). En resumen, de los resultados de diversos autores (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 1995, 1996, 1997; Lépiz *et al.*, 2010) se tiene que el peso de la semilla en la forma domesticada es 9 veces mayor en relación con la silvestre, similar a los límites que señalan Gepts y Debouck (1991), los cuales son de 20 a 100 g/100 semillas en la forma domesticada y de 6 a 14 g/100 semillas en la silvestre.

Según los resultados de Herrera y Acosta (2008) y García-Nava *et al.* (2014) quienes reportan el peso de 100 semillas para el caso del frijol silvestre “S13” y Fanjul *et al.* (1982) para el caso del frijol domesticado “Flor de Mayo X16441” (sembrado en campo, bajo condiciones de riego y a una densidad de 1 planta m⁻² en Chapingo, Estado de México), los cuales fueron los que se emplearon en el presente estudio, el peso de la semilla del frijol “Flor de Mayo X16441” es 10 a 12 veces mayor respecto al del frijol silvestre “S13”.

Miranda (1979) señala que así como en el caso de las vainas, para las semillas es difícil establecer un límite único de tamaño para el frijol silvestre y el domesticado, debido a que las dimensiones de dichos órganos en la forma silvestre se traslapan con las que presenta la forma domesticada. Para el caso de algunos materiales de la forma silvestre se reportan valores del número de semillas por planta de 383 (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 1997). En el caso del frijol silvestre “S13” García-Nava *et al.* (2014) reportan 1 120 semillas por planta, cultivado en macetas pequeñas (4.5 kg de sustrato).

En la forma domesticada de *P. vulgaris* existe aún una riqueza de diversidad genética que no ha sido utilizada en programas de mejoramiento (Acosta-Gallegos *et al.*, 2007). También la forma silvestre es un valioso recurso, por ejemplo, Guzmán-Maldonado *et al.*, 2003 encontraron mayor contenido de proteína, calcio, hierro y zinc en frijol silvestre (G-22837) que en el domesticado Bayo Baranda; por su parte López *et al.* (2005) mencionan que las variedades tradicionales son más heterogéneas y menos productivas, están bien adaptadas a su ambiente local y poseen una gran diversidad genética, por lo que es importante conservar estos recursos fitogenéticos.

En el presente trabajo se eligió el frijol silvestre “S13” por tratarse de un material con alto contenido de proteína (28%) (Pérez y Acosta, 2002; Herrera y Acosta, 2008) y por haber sido empleado como progenitor de poblaciones segregantes, habiendo dado como resultado un mayor número de plantas con rendimiento significativamente superior al progenitor domesticado Negro Tacaná como lo reportan Herrera y Acosta (2008). Por otra parte, se eligió al frijol domesticado “Flor de Mayo X16441” por tener el mismo hábito de crecimiento que el frijol silvestre “S13” (indeterminado tipo IV trepador). El objetivo del presente trabajo fue establecer las diferencias entre ambos materiales en cuanto a su fenología, morfología, componentes del rendimiento y algunos estimadores fisiológicos.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en invernadero en Montecillo, Estado de México (19° 30' latitud de norte y 98° 51' longitud oeste y a 2 250 msnm). Se utilizó la forma silvestre de *Phaseolus vulgaris* L. con número de registro G23429 (S13) (CIAT, 2017) y una forma domesticada X16441 de tipo Flor de Mayo (FM), ambas con crecimiento indeterminado tipo IV trepador. La forma S13 se colectó en Santa Isabel, Cholula, estado de Puebla, México (18.97° latitud de norte y 98.38° longitud oeste, a 1 430 msnm) y nos fue proporcionada por el Dr. Jorge A. Acosta Gallegos, del INIFAP. La forma FM es una variedad registrada con el número X-16441 en el banco de plasma germinal del Colegio de Postgraduados de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en Chapingo, Estado de México y colectada por Efraím Hernández Xolocotzi en Queréndaro, Michoacán, situada a 1 800 msnm, proveniente de un criollo de Ixmiquilpan, Hidalgo, México (Fanjul, 1978).

La siembra se realizó el 06 de mayo de 2014 en vasos de poliuretano de 250 mL de capacidad con tezontle de granulometría menor o igual a un centímetro, como sustrato. A los 20 días después de la siembra (dds) las plantas con la primera hoja compuesta desplegada correspondiente a la etapa V2 según Fernández *et al.* (1986) se trasladaron a macetas de plástico (una planta por maceta) con 18 kg de tezontle con la granulometría ya citada. Los primeros cinco dds, se regó con agua de la llave y posteriormente con solución nutritiva de Steiner (1984). A los 42 dds se instalaron espalderas empleando hilo para guiar individualmente las plantas.

Se llevó un registro de las etapas fenológicas (Fernández *et al.*, 1986), el final del ciclo de cultivo se consideró como madurez de cosecha a la cual se identificó como R9_F. Se realizaron tres muestreos destructivos durante la fase reproductiva, correspondientes a la etapa R6 (floración), a la R8 (llenado de vaina) y a la R9_F. En cada muestreo destructivo se registraron: el número de vainas por planta, el área foliar determinada mediante un medidor electrónico de área (Li-cor, LI-3100). Las plantas se disectaron en raíz, tallos, pecíolos, peciólulos y raquis, se pusieron a secar, conjuntamente con los órganos caídos, en una estufa (Blue M) a 70 °C, hasta alcanzar el peso constante. Para determinar el peso se empleó una báscula digital (Scout Pro).

Se calculó la duración de área foliar (DAF) empleando el índice de área foliar (IAF) según Tanaka y Yamaguchi (2014), así como el índice de llenado de la vaina (IV) de acuerdo con la fórmula propuesta por Kohashi (Escalante y Kohashi, 2015). En R9_F, se registraron para la semilla: peso por planta, número por planta, peso de 100 semillas. El número promedio de semillas por vaina se estimó con base en una muestra aleatoria de 20 vainas normales por planta. El índice de cosecha (IC) se calculó según la fórmula de Wallace *et al.* (1972). Asimismo, el índice de cosecha modificado (ICM) propuesto por Kohashi *et al.* (1980). Para la prueba de germinación se emplearon cuatro repeticiones de 25 semillas, de acuerdo con la metodología llamada “entre papel” (ISTA, 2014). No se escarificó la semilla en ninguna de las dos formas de frijol. Bajo este método de germinación, se contabilizaron las plántulas que desarrollaron estructuras normales. La temperatura se registró con un “data logger” (Extech® RTH10).

Diseño experimental y análisis estadístico. Se empleó un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para cada muestreo; la unidad experimental consistió en una planta por maceta. Se realizó una comparación de medias con la prueba de Mann-Whitney para las variables: número de vainas, número de semillas por planta y número de semillas por vaina. Asimismo, se empleó la prueba de “t” de Student para las variables: peso y volumen de la raíz, peso del vástago, área foliar, rendimiento de semilla, peso de una semilla y germinación de la semilla, DAF, IV e IC. Asimismo, al comparar algunas de las variables anteriores entre etapas, se realizó un análisis de varianza. Para las pruebas estadísticas se empleó el programa Infostat (2016) y para los gráficos SIGMA PLOT (2008) versión 11.

Resultados y discusión

Temperatura. La temperatura media semanal en todo el ciclo del cultivo se mantuvo en el intervalo de 20 a 25 °C, la cual según Masaya y White (1991) es la óptima para el crecimiento del frijol, ya que promueve la fotosíntesis, la respiración, la germinación de la semilla, asignación de materia seca, funcionamiento de la raíz y procesos reproductivos.

Fenología. Para S13, en el presente estudio, su ciclo fue de 137 d (Cuadro 1), lo cual discrepa con lo reportado por García-Urióstegui (2015), quien consignó un ciclo de 94 d bajo las mismas condiciones de cultivo del presente trabajo, pero como su estudio estaba enfocado al secado del grano, el muestreo lo realizó antes de que la planta llegara a madurez de cosecha. En el presente estudio el ciclo de FM fue de 118 dds (Cuadro 1). Fanjul *et al.* (1982) reportaron una duración de 153 d después de la emergencia (175 dds) para este mismo material sembrado en campo. La forma silvestre S13 exhibió un ciclo más largo (19 d) que FM en condiciones de invernadero. La duración del ciclo del cultivo es multifactorial.

Cuadro 1. Días después de la siembra para cada etapa fenológica en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441).

Tipo de frijol	V1	V2	V3	V4	R5	R6	R7	R8	R9	R9 _F
Silvestre	8	14	21	30	63	67	71	83	119	137
Domesticado	6	9	20	29	51	57	60	71	102	118

V1= emergencia; V2= hojas primarias; V3= primera hoja compuesta; V4= tercera hoja compuesta; R5= prefloración; R6= floración; R7= formación de vainas; R8= llenado de vainas; R9= inicio de maduración y R9_F= madurez de cosecha.

Fernández *et al.* (1986) mencionan que la duración de las distintas etapas fenológicas está afectada además por el hábito de crecimiento, por el clima, el suelo y el genotipo. Desde la etapa de prefloración (R5) S13 fue más tardío que FM. Posiblemente una temperatura más alta en el invernadero influyó para acelerar las etapas fenológicas en FM respecto a su cultivo en campo por Fanjul *et al.* (1982), quienes reportan un intervalo de temperatura media entre 14 y 20 °C. Se puede suponer que con el S13 también se han acelerado sus etapas fenológicas; sin embargo, al no contar con registros de temperatura de su cultivo en campo, esto no se puede confirmar.

El inicio de la etapa de floración (R6) en S13 fue a los 67 dds, mientras García-Urióstegui (2015) reporta 61 dds (bajo las mismas condiciones); en FM en el presente trabajo fue a los 57 dds vs 86 d después de la emergencia (108 dds) reportado por Fanjul *et al.* (1982). En S13 la etapa R8 se

inició a los 16 días después de la antesis, contrastando con lo reportado por García-Urióstegui (2015) donde se inició aproximadamente 9 días después de la antesis; asimismo se observó que la duración entre las etapas R6 y la R8 son muy similares entre S13 y FM (Cuadro 1).

Componentes morfológicos y fisiológicos

La presencia de botones en R8 y R9_F indica que la fase vegetativa presentó traslapeo durante el ciclo de cultivo con todas las etapas reproductivas tanto en S13 como en FM, lo cual se podría atribuir al tipo de hábito de crecimiento indeterminado trepador que presentan ambos materiales de frijol. No se observaron diferencias en el número de vainas por planta en la etapa R6 entre S13 y FM (Cuadro 2), mientras que en R8 y R9_F (en R9_F no se contabilizaron las vainas vanas) el número fue notablemente mayor en S13 (1014) que en FM (131), lo cual para el caso de S13 puede apreciarse la similitud con lo reportado por García-Urióstegui (2015) al señalar 817 vainas por planta (dato poco menor debido a que el objetivo de su investigación no demandaba esperar la madurez de cosecha), lo cual representa una ventaja para el frijol silvestre ya que es una variable correlacionada con el número de semillas por planta (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 1999).

Cuadro 2. Número de vainas por planta en tres etapas fenológicas del frijol silvestre (S13) y del domesticado (Flor de Mayo X16441).

Etapa fenológica	Tipo de frijol	Número de vainas	
R6	Silvestre	4 [†]	a
	Domesticado	6 [†]	a
R8	Silvestre	45 [†]	a
	Domesticado	197 [†]	b
R9 _F	Silvestre	1014 ^{††}	a
	Domesticado	131 ^{††}	b

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); la comparación es entre tipo de frijol por cada etapa; R6= inicio de la etapa de floración; R8= inicio de la etapa de llenado de vainas; R9_F= madurez de cosecha; [†]= número de vainas totales (se incluyen vainas mayores o menores a 3 cm); ^{††}= número de vainas normales que llegaron a madurez.

El peso de una semilla de S13 representó 14% del de FM (Cuadro 3). El peso de una semilla de S13 en el presente trabajo está de acuerdo con lo reportado por García-Nava *et al.* (2014) y por García-Urióstegui (2015), quienes también lo cultivaron en invernadero. El peso de la semilla por planta fue menor en S13 con respecto a FM (Cuadro 3). El número de semillas por planta para S13 fue 4.4 veces mayor que para FM, lo cual está en relación directa con un mayor número de vainas normales en S13 (Cuadro 3) condición que según Schwanitz (1966) caracteriza a las plantas silvestres. García-Nava *et al.* (2014) obtuvieron valores menores (1120) al cultivarlo en una maceta más pequeña (4.5 kg de sustrato).

Un mayor número de semillas por planta es una estratagema fisiológica de la forma silvestre para asegurar su supervivencia en ambientes naturales (Schwanitz, 1966), mientras en el domesticado aun cuando el número de semillas es menor, se incrementan algunos valores de importancia antropogénica como el aumento de tamaño en la semilla (Peña *et al.*, 2012). Existe diferencia en el número de semillas por vaina entre S13 con 4 y FM con 6 semillas por vaina, lo que coincide para S13 con García-Urióstegui (2015), y para FM con lo indicado por Fanjul *et al.* (1982).

Cuadro 3. Producción, peso de una semilla, número de semillas por planta y por vaina en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en la etapa R9_F.

Tipo de frijol	Producción de semilla (g pl ⁻¹) [†]	Peso de una semilla (mg) [†]	Número de semillas por planta ^{††}	Número de semillas por vaina
Silvestre	129.65 b	42.38 b	3067 a	4 (± 1.19) b
Domesticado	213.8 a	305 a	698 b	6 (± 1.03) a

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); [†]= dato de peso al 12% de humedad; ^{††}= se determinó con base en el peso de semilla por planta y el peso de 100 semillas al momento de la cosecha.

La prueba de germinación se realizó aproximadamente 15 días después de la cosecha. S13 alcanzó 100% de germinación a las 24 h después de iniciada la prueba, mientras que FM lo alcanzó a las 48 h, disminuyendo el porcentaje de plantas sanas al noveno día, llegando a ser estadísticamente igual en ambos tipos de frijol (88 y 84%, respectivamente). Se ha considerado que el frijol silvestre posee latencia física (Korban *et al.*, 1981), causada por la impermeabilidad de la testa según Gepts y Debouck (1991). En el presente estudio no se detectó latencia, adicionalmente, Gómez *et al.* (1999) indican que para el caso de S13 el hilo es la principal estructura por donde se lleva a cabo la imbibición, aún cuando la testa es impermeable. En relación al área foliar en ambas formas de frijol, el máximo valor se registró en la etapa R8, en el caso de S13 la planta conservó gran cantidad de hojas en el lapso de R8 a R9_F sin diferencia estadística entre estas. En FM se presentó un marcado descenso del área foliar (más de 50%) en la R9_F respecto a la máxima. El área foliar por planta entre S13 y FM fue estadísticamente igual en las etapas R6 y R8, mientras que en la R9_F fue superior en S13 (comparación no mostrada en la Figura 1).

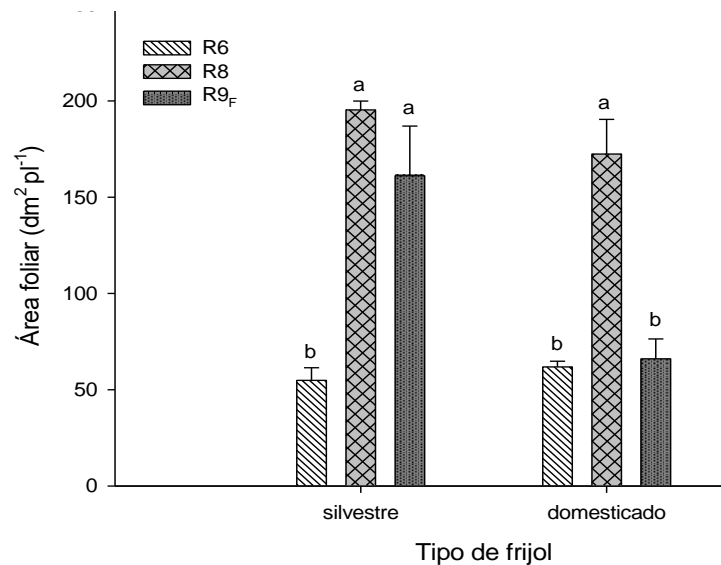


Figura 1. Área foliar de frijol silvestre (S13) y de domesticado Flor de Mayo X16441 (FM) en tres etapas fenológicas, cultivados en hidroponía e invernadero. Barras con distinta letra dentro de tipos son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). R6= inicio de la etapa de floración; R8= inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F= madurez de cosecha.

Peso seco de órganos. En R8, el peso seco (PS) de las láminas foliares fue estadísticamente menor en S13 (65.27 g) respecto a FM (81.35 g). Es importante destacar que el PS del pericarpio por planta fue mayor en el S13 que en FM (144.91 g vs 82.28 g) (pesos implícitos en el total del Cuadro 4), este mayor peso en el S13 está relacionado con lo que señala Miranda (1979) al indicar que en el pericarpio el contenido de fibra y sus componentes se ha reducido en el frijol domesticado. Smartt (1988) señala que los tejidos de las vainas primitivas se encuentran sumamente lignificadas, lo cual explicaría el mayor peso del pericarpio en la forma silvestre. El PS del vástago presentó diferencias entre S13 y FM en las etapas R8 y R9_F (Cuadro 4).

Cuadro 4. Peso seco de órganos y total por planta (g) en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas.

Etapas fenológicas	Tipo de frijol	Órganos caídos	Vástago	Raíz	Total
R6	S13	0.13 a	36.71 a	3.34 b	40.06 a
	FM	0.35 a	39.49 a	4.55 a	44.03 a
R8	S13	2.8 a	177.14 b [†]	13.43 a	190.57 b
	FM	2.07 a	207.28 a [†]	13.73 a	221.01 a
R9 _F	S13	73.87 a	575.33 a [†]	16.83 a	592.16 a
	FM	73.18 a	512.96 b [†]	18.95 a	531.91 b

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); R6= inicio de la etapa de floración; R8= inicio de la etapa de llenado de vainas; R9_F= madurez de cosecha; [†]= se incluyó el peso seco de las vainas con sus semillas, pero sólo en R9_F el peso seco de las semillas se encuentran 12% de humedad.

En la etapa R8 fue mayor el peso en FM, debido a que las vainas han comenzado su llenado y el peso que representa la semilla en crecimiento, juntamente con el peso de las láminas foliares que persistieron, hacen que sea mayor. En la R9_F, el peso total por planta en el FM fue mayor con respecto al de S13; de acuerdo con Miranda (1979) la domesticación ha reducido el número de ramas por planta, de hojas y de nudos por inflorescencia, entre otras variables. Lo anterior, se deduce que en la forma domesticada una mayor proporción de fotoasimilados se asignó a la semilla, mientras en la forma silvestre se asignan a los otros órganos. Dichos fotoasimilados en el S13 y FM prioritariamente se asignaron al tallo y ramas, ya que el peso de las hojas (implícito en el peso de vástago del Cuadro 4), órganos caídos y raíz no mostraron diferencias estadísticas en R9_F. Un mayor peso seco total por planta en S13 muestra una actividad más prolongada de las hojas para producir fotoasimilados reflejada por un mayor valor de la DAF (Cuadro 5).

Cuadro 5. Duración de área foliar e Índice de llenado de vaina en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	DAF (días)		IV [†] (%)
	R6-R8	R8-R9 _F	
Silvestre	50.04 a	178.23 a	47.3 b
Domesticado	49.2 a	95.41 b	72.07 a

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); la comparación es entre tipo de frijol; DAF= duración de área foliar; IV= índice de llenado de vaina; R6= inicio de la etapa de floración; R8= inicio de la etapa de llenado de vainas; R9_F= madurez de cosecha; [†]= cálculo con peso de semilla 12% de humedad.

El peso seco de la raíz en S13 respecto a la de FM fue diferente únicamente en la etapa R6 donde FM fue mayor y pudiera estar indicando también la precocidad de este; para las etapas R8 y R9_F no hay diferencias entre ambos materiales. El peso seco de la raíz refleja que hubo un desarrollo de ésta en ambos tipos de frijol tanto de la etapa R6 a la R8, como de la R8 a la R9_F (Figura 2).

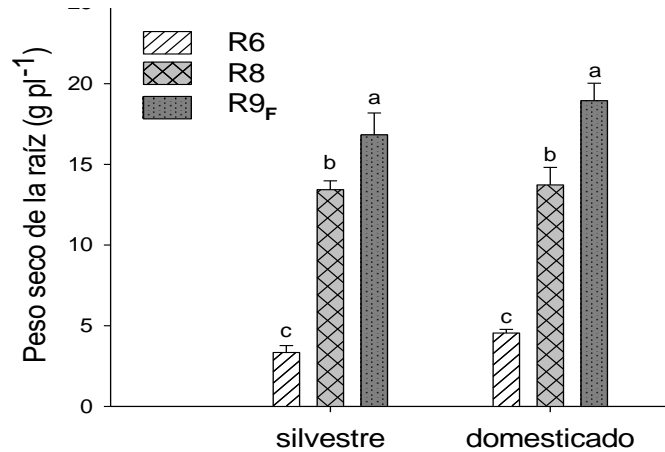


Figura 2. Peso seco de la raíz en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); R6= inicio de la etapa de floración; R8= inicio de la etapa de llenado de vainas; R9_F= madurez de cosecha.

La DAF fue mayor en S13 en el lapso de R8 a R9_F (Cuadro 5). Lo anterior debido a que el IAF de R8 a R9_F permanece igual en S13 (3.91 y 3.22, respectivamente), mientras que en FM disminuyó drásticamente de 3.45 a 1.32. La DAF proporciona una estimación del tiempo en el cual el follaje es funcional como maquinaria productora de fotosintatos (Rodríguez-Montero y Leihner, 2006). Lo anterior indica que S13 podría tener un periodo mayor para la formación de nuevos frutos; sin embargo, no tenemos evidencia que esto ocurra necesariamente porque en un domesticado de hábito de crecimiento tipo I se pudo observar que aunque se producen muchas flores en la segunda mitad del periodo de floración, estas no se tradujeron en frutos (Prieto y Kohashi, 1981). El índice de llenado de vaina (IV) en el FM es mayor respecto al S13 (Cuadro 5), lo cual juntamente con los resultados del peso de pericarpio, reafirma que probablemente en las valvas del frijol silvestre se asigna una mayor cantidad de fotoasimilados. La DAF fue menor en el periodo comprendido entre R6 y la R8 respecto al periodo comprendido de la etapa R8 a la R9_F, tanto en FM como en S13 (Cuadro 5).

La tasa de asimilación neta es la velocidad de incremento en peso por unidad de área foliar (Tanaka y Yamaguchi, 2014), para la S13 fue de 0.05 ($\text{g dm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y 0.07 para FM, entre la etapa R8 y R9_F, siendo estadísticamente diferentes, lo cual implica que FM acumula biomasa más rápidamente. En el presente estudio, cuando al cálculo del IC no se incluye el Peso seco (PS) de los órganos caídos ni de la raíz se le ha llamado Índice de cosecha tradicional (ICT) (Wallace *et al.*, 1972). Asimismo, se llama Índice de cosecha modificado (ICM) a aquél en que se incluyó el PS de los órganos caídos (Kohashi *et al.*, 1980), pero no necesariamente el de la raíz. Tanto el ICT como el ICM es mayor en el frijol domesticado, lo cual ya se esperaba debido a que la domesticación de este material se ha basado en un mayor tamaño de semillas.

Concomitantemente se tiene como resultado que, tanto para el frijol domesticado como para el silvestre, la inclusión del PS de los órganos caídos simultáneamente con el PS de la raíz en el cálculo del IC, resulta ser significativamente diferente comparado con el ICT (Cuadro 6).

Cuadro 6. Índice de cosecha en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	ICT [†]	ICT _{CR} [†]	ICM [†]	ICM _{CR} [†]
Silvestre	0.26 b	0.25 b	0.23 b	0.22 b
Domesticado	0.49 a	0.47 a	0.42 a	0.4 a

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$); ICT= índice de cosecha tradicional, donde no se incluye peso seco de órganos caídos; ICM= índice de cosecha modificado, incluye peso seco de órganos caídos. ICM_{CR}= incluye peso seco de raíz; †= peso de semilla 12% de humedad. En rendimiento biológico se incluyó peso seco del pericarpio.

Conclusiones

En cuanto a la fenología, la forma silvestre S13, presenta un ciclo mayor que la domesticada FM lo que está relacionado con una mayor producción de materia seca y representa una ventaja de S13 en climas que no presentan heladas porque puede aprovechar por más tiempo la energía solar para producir semilla. La anterior característica es concomitante con una mayor área foliar y su duración en S13 respecto al FM por lo que tiene mayores posibilidades de seguir generando fotosintatos para ser empleados en las estructuras reproductivas que están en desarrollo. Las características mencionadas favorecen su supervivencia en ambientes naturales y podrían ser aprovechadas para el mejoramiento genético de la forma domesticada. La forma domesticada FM presentó un mayor: tamaño de semilla, índice de cosecha, índice de llenado de vaina, mismas que representan una ventaja con respecto a S13. Un valor más alto del índice de cosecha en FM, indica que se asignan mayor proporción de fotosintatos hacia la producción de semilla (planta más eficiente para rendimiento de grano). El mayor índice de llenado de la vaina en FM respecto a S13 indica una proporción más alta de fotosintatos asignados al grano que al pericarpio.

Agradecimientos

Al Dr. Jorge Acosta Gallegos, por proporcionar el material del frijol silvestre S13. Al Colegio de Postgraduados por el financiamiento del presente estudio y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al primer autor en sus estudios de Maestría.

Literatura citada

- Acosta, G. J. A.; Kelly, J. D. and Gepts, P. 2007. Prebreeding in common bean and use of genetic diversity from wild germplasm. International Plant Breeding Symposium. Crop Sci. 47 (S3):S44-S59.
- Bayuelo, J. J. S.; Peña, V. C. B. and García N. R. 1995. Relation between yield components and morphological characteristics of bean in a gradient of domestication. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. (38):31-32.

- Bayuelo, J. J. S.; Peña, V. C. B. and Aguirre, R. J. R. 1996. Phenotypic expression of the wild common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations from two contrasting geographical areas. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. (39):205-206.
- Bayuelo, J. J. S.; Aguirre R., J. R. and Peña, V. C. B. 1997. Yield determining traits in two mexican wild common bean populations from contrasting geographical origin. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. (40):28-29.
- Bayuelo, J. J. S.; Peña, V. C. B. and Aguirre, R. J. R. 1999. Yield components of samples of two wild Mexican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations grown under cultivation. South Afr. J. Plant Soil. 16(4):197-203.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 2017. Programa de Recursos Genéticos. Colecciones. <http://ciat.cgiar.org/what-we-do/crop-conservation-and-use/>.
- Delgado, S. A.; Bonet, A. and Gepts, P. 1988. The wild relative of *Phaseolus vulgaris* in Middle America. In: Genetic resources of *Phaseolus* beans: their maintenance, domestication, evolution and utilization. Gepts, P. (Ed.). Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 163-184 pp.
- Escalante, E. J. y Kohashi, S. J. 2015. El rendimiento y crecimiento del frijol: manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 84 p.
- Fanjul, L. 1978. Análisis del crecimiento de una variedad de *Phaseolus vulgaris* L. de hábito de crecimiento indeterminado y ensayo para el estudio de las relaciones entre la fuente y la demanda de los fotosintatos. Tesis de Maestro en Ciencias. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. 157 p.
- Fanjul, L.; Kohashi, S. J. and Hernández, X. E. 1982. Yield Potencial and Stratified Growth Analysis of an indeterminate climbing pole bean (*Phaseolus vulgaris*) in México. Exp. Agric. 18(2):167-175.
- Fernández, F.; Gepts, P. y López, M. 1986. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). CIAT. Cali, Colombia. 33 p.
- García, H. E.; Peña, V. C. B.; Aguirre, R. J. R. y Muruaga M. J. S. 1999. Contraste morfológico y fisiológico de *Phaseolus vulgaris* L. silvestre y domesticado. Rev. Chapingo Ser. Ing. Agrop. 2(1):61-68.
- García, N. J. R.; García, E. A.; Kohashi, S. J.; Uscanga, M. E. and Peña, V. C. B. 2014. Seed yield and its components of wild and cultivated *Phaseolus vulgaris* L. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. 57:303-304.
- García, U. A. 2015. Secado de la semilla y su calidad fisiológica, y el rendimiento de frijol silvestre, domesticado y sus líneas. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, Texcoco, Edo Méx. 71 p.
- Gentry, H. S. 1969. Origin of the common bean, *Phaseolus vulgaris*. Econ. Bot. 23:55-69.
- Gepts, P. and Debouck, D. 1991. Origin, domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: common beans: research for crop improvement. Schoonhoven, A. V. and Voysest, O. (Eds.). CAB International y CIAT: Wallingford. UK. 7-43 pp.
- Gepts, P. 1998. Origin, domestication and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). HortSci. 33(7):1124-1130.
- Gómez, R. M. C.; Pérez, H. P.; Valdés, C. J. and Acosta, G. J. A. 1999. Characteristics of the seed coat in wild and cultivated *Phaseolus vulgaris* L. Annual Reports. Bean Improvement Cooperative. 42:91-92.
- Guzmán, M. S. H.; Martínez, O.; Acosta, G. A. J.; Guevara, L. F. and Paredes, L. O. 2003. Putative qualitative trait loci for physical and chemical components of common bean. Crop Sci. 43:1029-1035.

- Hernández, L. V. M.; Vargas, V. M. P.; Muruaga, M. J. S.; Hernández, D. S. y Mayek, P. N. 2013. Origen, domesticación y diversificación del frijol común. Avances y perspectivas. *Fitotec. Mex.* 36(2):95-104.
- Herrera, F. T. S. y Acosta, G. J. A. 2008. L.. Rendimiento de tres tipos de cruza entre genotipos silvestres y cultivados de frijol (*Phaseolus vulgaris* Agric. Téc. Méx. 34(2):167-176.
- Hill, A. F. 1952. *Economy botany*. Second Edition. McGraw-Hill. New York. 560 p.
- InfoStat. 2016. InfoStat versión estudiantil. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ISTA (International Seed Testing Association). 2014. The germination test. International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, CH Switzerland. 5:1-50.
- Kaplan, L. and Lynch, T. F. 1999. *Phaseolus* (Fabaceae) in archaeology: AMS radiocarbon dates and their significance for pre-colombian agriculture. *Econ. Bot.* 53(3):261-272.
- Kohashi, S. J.; Caprio, da C. J. and Miranda, C. S. 1980. Harvest index in *Phaseolus vulgaris* L. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. (23):87-89.
- Korban, S. S.; Coyne, D. P. and Weihing, J. L. 1981. Rate of water uptake and sites of water entry in seeds of different cultivars of dry bean. *HortSci.* 16(4):545-546.
- Lépiz, I. R.; López, A. J. J.; Sánchez, G. J. J.; Santacruz, R. F.; Nuño, R. R. y Rodríguez, G. E. 2010. Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Rev. Fitotec. Mex.* 33(1):21-28.
- López, S. J. L.; Ruíz, C. J. A.; Sánchez, G. J. y Lépiz, I. R. 2005. Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestre (*Phaseolus* spp) en la República Mexicana. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(3):221-230.
- Masaya, P. and White, J. W. 1991. Adaptation photoperiod and temperature. *In: common beans: research for crop improvement*. Schoonhoven, A. van. and Voysest, O. (Eds.). CAB International y CIAT. Wallingford. UK. 445-500 pp.
- Miranda, C. S. 1979. Evolución de *Phaseolus vulgaris* y *P. coccineus*. *In: contribuciones al conocimiento del frijol (Phaseolus) en México*. Engleman, M. E. (Ed.). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 83-99 pp.
- Peña, V. C. B.; Aguirre, R. R. y Arroyo, P. V. B. 2012. El frijol silvestre. Síndrome de domesticación. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. México. 206 p.
- Pérez, H. P. y Acosta, G. J. A. 2002. Permeabilidad de la testa y la porción micrópilo-Hilio en semilla de frijol silvestre y cultivado. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(1):57-63.
- Prieto, B. V. y Kohashi, S. J. 1981. El orden de anthesis y la ubicación de las flores: su relación con el rendimiento y sus componentes en frijol, *Phaseolus vulgaris* L., de hábito determinado cv cacahuete 72. *Chapingo, Nueva Época.* 90:29-30.
- Rodríguez, M. W. y Leihner, D. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. *In: fisiología de la producción de los cultivos tropicales*. Rodríguez, E. V. (Ed.). Universidad de Costa Rica. 42 p.
- Schwanitz, F. 1966. *The origin of cultivated plants*. Harvard University Press. Cambridge MA. 175 p.
- SIGMAPLOT. 2008. Sigma Plot 2008 V.11.0. Systat Software Inc., Point Richmond, California.
- Smartt, J. 1988. Morphological, physiological and biochemical changes in *Phaseolus* beans under domestication. *In: genetic resources of Phaseolus beans*. Gepts, P. (Ed.). Kluwer. Dordrecht, Netherlands. 143-161 pp.
- Steiner, A. A. 1984. The Universal Nutrient Solution. ISOSC. *In: 6th International Congress on Soilless Culture*. 633-649 pp.

- Tanaka, A. y Yamaguchi, J. 2014. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. 4a ed. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. 86 p.
- Toro, O.; Tohme, J. and Debouck, D. 1990. Wild bean (*Phaseolus vulgaris* L.): description and distribution. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 106 p.
- Vázquez, C. G. y Cárdenas, R. F. 1992. Características físicas, tecnológicas y proteínicas de frijoles (*P. vulgaris* L.) silvestres y domesticados. Arch. Latinoam. Nutr. 42(2):201-209.
- Wallace, D.; Ozbun, J. and Munger, H. 1972. Physiological genetics of crop yield. (24):97-146.