



Morphological and agronomic variability of bean germplasm cultivated in Oaxaca, México

Variabilidad morfológica y agronómica de germoplasma de frijol cultivado en Oaxaca, México

García-Narváez, A. L.¹, Hernández-Delgado, S.¹, Chávez-Servia, J. L.², Mayek-Pérez, N.^{1,3*}

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Biotecnología Genómica. Blvd. Del

Maestro s/n esq. Elías Piña, Col. Narciso Mendoza, 88710, Reynosa, Tamaulipas, México.

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca. Hornos 1003, Col. Noche Buena, 71230, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

³ Universidad México Americana del Norte. Primera s/n, Col. El Círculo, 88640, Reynosa, Tamaulipas, México.

Cite this paper/Como citar este artículo: García-Narváez, A. L., Hernández-Delgado, S., Chávez-Servia, J. L., Mayek-Pérez, N. (2020). Morphological and agronomic variability of bean germplasm cultivated in Oaxaca, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 7, e876. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e876>



ABSTRACT

In México, farmers do bean (*Phaseolus* spp.) seed mixes at sowing as a cushion strategy against climatic variation (rainfall patterns) during the crop cycle, mainly rainfall patterns. This practice is poorly documented on their effects on bean genetic population structure. The objective of this work was to characterize the morphological variability of 75 bean accessions cropped through six regions of Oaxaca: Mixteca, Sierra Norte, Sierra Sur, Istmo, Valles Centrales and Cañada. The hypothesis was that there is significant morphologic and agronomic variability in Oaxaca's bean germplasm which is related to geographical origin. Germplasm was grown in pots under greenhouse conditions at Reynosa, Tamaulipas, and was randomized under a randomized completely experimental design with three replications.

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: November 15th 2019.

Accepted/Aceptado: August 18th 2020.

Available on line/Publicado: September 18th 2020.

*Corresponding Author:

Netzahualcoyotl Mayek-Pérez. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Biotecnología Genómica. Blvd. Del Maestro s/n esq. Elías Piña, Col. Narciso Mendoza, 88710, Reynosa, Tamaulipas, México. Universidad México Americana del Norte. Primera s/n, Col. El Círculo, 88640, Reynosa, Tamaulipas, México. E-mail: nmayeklp@yahoo.com.mx

RESUMEN

En México, los agricultores frecuentemente mezclan sus semillas de frijol (*Phaseolus* spp.) al momento de la siembra como estrategia de amortiguamiento ante la variación climática (lluvias) durante el ciclo de cultivo. Sin embargo, poco se sabe sobre el efecto de dicha práctica en la estructura genética del frijol en manos de los agricultores. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la variabilidad morfológica y agronómica de 75 accesiones de frijol, cultivado por agricultores de las regiones de Oaxaca: Mixteca, Sierra Norte, Sierra Sur, Istmo, Valles Centrales y Cañada. La hipótesis fue que existe variabilidad morfológica y agronómica significativa en el germoplasma oaxaqueño de frijol y que está se relaciona con el origen geográfico. El germoplasma fue cultivado en macetas en invernadero en Reynosa, Tamaulipas, se aleatorizó en un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. La variabilidad morfológica y agronómica fue amplia; las variables más explicativas de la variabilidad fueron área foliar; peso de 100 semillas y los días para la formación, llenado y maduración de vainas. Aunque no hay relación entre el origen geográfico y el agrupamiento

The morphologic and agronomic variability were broad and the most explicative traits were leaf area; 100-seeds weight; days to pod formation, filling and maturation. Despite no relationship between geographical origin and clustering based on morphological traits were found, germplasm was grouped according to ethnic origin. The identified groups were Mixteca-Istmo, Sierra Norte-Mixteca and Cañada-Sierra Sur-Valles Centrales.

KEY WORDS

Phaseolus vulgaris L., morphological traits, genetic resources.

Introduction

Mesoamerica is the center of origin, domestication and diversification of several crops that currently are major components of world food, especially for Mexico. In this sense outstanding species are maize (*Zea mays* L.) and beans (*Phaseolus* sp.) due to their contribution to familial economy and feeding, as well as their social-cultural value for marginalized communities of Mexico and low costs (Hernández-López *et al.*, 2013; Chávez-Servia *et al.*, 2016).

The bean species with a broad distribution in Mexico as wild, semi-domesticated or domesticated forms are: *P. vulgaris* L., *P. coccineus* ssp., *P. lunatus* L., *P. acutifolius* Gray, and *P. dumosus* (Hernández-Delgado *et al.*, 2015). In Oaxaca have been found the species *P. lunatus*, *P. coccineus*, *P. vulgaris* and *P. dumosus* (Gepts, 2014). Domesticated and semi-domesticated species are known as natives, traditional or landraces, too and they own unique traits due to their adaptation to specific agroecological niches, derived from human or natural selection which combined with mutations, migration and/or genetic drift, resulted on special genotypes or genetic structure of populations. These genotypes are known by farmers by using special phenotypic traits or names as broad or narrow adaptability to diverse agroecosystems, tolerance to diseases, pod traits, precocity, the use of pods as 'green beans' or some other special uses. The study of traditional cropping and their species in its center of domestication allows us the understanding of evolution and diversification patterns and helps us to keep records about gene reservoir traits and its exploitation for breeding (Hernández-López *et al.*, 2013).

con base en caracteres morfológicos, el germoplasma se agrupó de acuerdo con la etnia de origen. Los grupos identificados fueron Mixteca-Istmo, Sierra Norte-Mixteca y Cañada-Sierra Sur-Valles Centrales.

PALABRAS CLAVE

Phaseolus vulgaris L., caracteres morfológicos, recursos genéticos.

Introducción

Mesoamérica es centro de origen, domesticación y diversificación de diferentes cultivos, que actualmente son parte de la alimentación mundial y en especial de la mexicana. Destacan el maíz (*Zea mays* L.) y el frijol (*Phaseolus* sp.) por su aportación a la economía y alimentación familiar, por su alto valor sociocultural para las comunidades marginadas de México y por su bajo costo (Hernández-López *et al.*, 2013; Chávez-Servia *et al.*, 2016).

Las especies de frijol de amplia distribución en México como formas silvestres, semi-domesticadas y domesticadas son: *P. vulgaris* L., *P. coccineus* ssp., *P. lunatus* L., *P. acutifolius* Gray y *P. dumosus* (Hernández-Delgado *et al.*, 2015). En Oaxaca se distribuyen *P. lunatus*, *P. coccineus*, *P. vulgaris* y *P. dumosus* (Gepts, 2014). Las especies domesticadas y semi-domesticadas (también conocidas como nativas, tradicionales o criollas) poseen características únicas, debido a que están adaptadas a nichos agroecológicos particulares, producto de la selección humana y natural, que combinada con procesos de mutación, migración y/o deriva genética, produjeron genotipos o estructuras genéticas especiales. Estos genotipos se reconocen por los agricultores con nombres y caracteres fenotípicos especiales como amplia o estrecha adaptabilidad a diversos agro-sistemas de producción, tolerancia a enfermedades, caracteres de vaina, precocidad, uso como ejotes o usos especiales. El estudio del cultivo tradicional y sus especies en su centro de domesticación permite entender la evolución y diversificación, además, ayuda a documentar las características de los reservorios de genes y su aprovechamiento para el mejoramiento genético (Hernández-López *et al.*, 2013).

Los agricultores utilizan una mezcla de semillas de diferentes poblaciones de frijol con color de grano

Farmers mix seeds from different bean populations including varied seed coats as strategy to cushion variable climatic conditions (erratic rainfall patterns, extreme temperatures, pests, diseases, etc.) (Castillo-Mendoza et al., 2006; Espinosa-Pérez et al., 2015). Seed mixing modifies the genetic structure of bean populations, but the evolution of beans under this scheme is poorly understood (Chávez-Servia et al., 2016).

The study of genetic diversity into the center of origin and domestication of common beans is an easy and successful method to identify primary sources (populations) of useful genes for breeding, as well as knowledge to improve our understanding about evolution, diversification and *in situ* conservation of *Phaseolus* (Hernández-López et al., 2013). That information allows us to generate strategies for the genetic base broadening of released cultivars and for conservation, management and exploitation of the species (Hernández-Delgado et al., 2015).

The aim of this work was to characterize the morphological variability of one bean collection with indeterminate growth from the state of Oaxaca, México under greenhouse conditions. The hypothesis was that there are significant morphological and agronomic variability in the bean germplasm from Oaxaca, and variability is related to geographic origin.

Material and Methods

Genetic material

The work included 75 bean populations collected from November 2015 to March 2016 through different agroecological regions of Oaxaca. During collection was georeferenced the community and municipality of each collection, sample origin, local name, outstanding trait, seed coat color, among other collection descriptors. The ethnolinguistic group to which belongs each collection was also registered (Figure 1).

Seed and plant description

Plants were developed under greenhouse conditions at CBG-IPN in Reynosa, Tamaulipas. Pots of 5 L were filled with 5-kg regional agricultural soil and irrigated with 750 mL of tap-water every 2-4 days as been needed. Sowing was carried out by August 30, 2016, five seeds per pot and three pots per accession (replications). Pots were randomized in a completely randomized design. Four

variado como estrategia para amortiguar los efectos del clima variable (temporal de lluvias errático, temperaturas extremas, plagas, enfermedades, etc.) (Castillo-Mendoza et al., 2006; Espinosa-Pérez et al., 2015). La mezcla de semilla, modifica la estructura genética de las poblaciones de frijol, sin embargo, se conoce poco sobre la evolución del cultivo bajo este esquema. (Chávez-Servia et al., 2016).

El estudio de la diversidad genética en el centro de origen y de domesticación del frijol común es un método sencillo y exitoso para identificar fuentes primarias (poblaciones) de genes útiles para el mejoramiento genético, así como elementos para mejorar el entendimiento de la evolución, diversificación y conservación *in situ* de *Phaseolus* (Hernández-López et al., 2013). Dicha información permitirá generar estrategias para ampliar la base genética de las variedades comerciales, y para la conservación, manejo y aprovechamiento de la especie (Hernández-Delgado et al., 2015).

El objetivo de este estudio fue caracterizar la variabilidad morfológica de una colección de frijol de crecimiento indeterminado, originario del estado de Oaxaca, México en invernadero. La hipótesis fue que existe variabilidad morfológica y agronómica significativa en el germoplasma oaxaqueño de frijol, misma que se relaciona con el origen geográfico.

Material y Métodos

Material genético

El estudio incluyó 75 poblaciones de frijol recolectadas de noviembre 2015 a marzo 2016 en diferentes regiones agroecológicas de Oaxaca. Durante la colecta se georeferenció la ubicación de la comunidad y municipio mediante un geoposicionador, además, del origen de la muestra, nombre local, característica sobresaliente y color de grano, entre otros descriptores de colecta; también se documentó el grupo etnolingüístico al que pertenece el dueño de la muestra (Figura 1).

Descripción de semilla y planta

El cultivo se desarrolló en invernadero del CBG-IPN en Reynosa, Tamaulipas. Macetas de 5 L fueron llenadas con 5 kg de suelo agrícola de la región, se regaron con 750 mL de agua (cada 2-4 días según fue requerido). La siembra se realizó el 30 de agosto de 2016, cinco semillas por maceta. Tres macetas por accesión (repeticiones). Las macetas se aleatorizaron en un diseño completamente al azar. Complementariamente se incluyeron cuatro testigos:

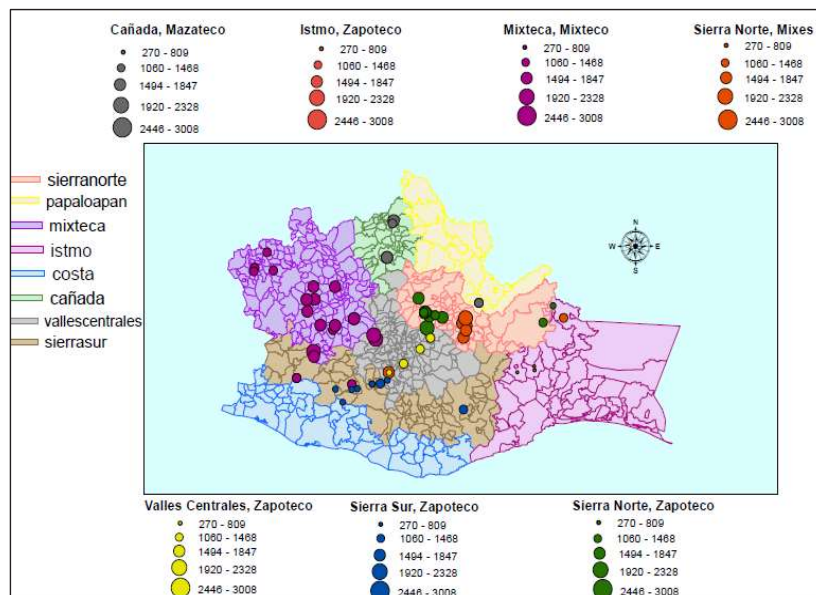


Figure 1. Origin of bean germplasm characterized based on morphologic and agronomic data classified by region and ethno-linguistic group and altitude of collection.

Figura 1. Origen del germoplasma de frijol por región, grupo etnolingüístico de origen y altitud de colecta, caracterizado morfológica y agrónomicamente.

controls were included: cultivars Negro Jamapa, and Negro Comapa; Pinto Villa, and Pinto Saltillo (released cultivars) (Rosales-Serna *et al.*, 2004).

After sowing days to emergence and color of hypocotyls, are registered as well as days to the appearance of primary leaflets, the first, second and third trifoliate leaves. After, we registered the days to flowering, to pod formation and filling, and days to physiological maturity; color of flowers, growth habit (Debouck & Hidalgo, 1984), and leaf area. To harvest the primary and secondary seed colors were registered (Munsell color Company, 1977), as well as brightness, mottle patterns and seed shape (IBPGR, 1982). After, length, width and thickness of seeds were measured (Espinoza-Pérez *et al.*, 2015) and seed sizes were classified (Singh, 1989; Singh *et al.*, 1991).

Statistical analysis

Data were registered in Excel (MS-2010). For qualitative variables relative frequencies by each class, the region of origin, and the ethnolinguistic group were

Negro Jamapa, Negro Comapa, Pinto Villa y Pinto Saltillo (variedades comerciales) (Rosales-Serna *et al.*, 2004).

Después de la siembra se registraron los días para la emergencia y el color del hipocótilo; los días para la emisión de las hojas primarias, además del primero, segundo y tercer trifolio. Luego, se evaluaron los días de siembra a la floración, la formación y el llenado de vainas, así como a la madurez fisiológica; el color de la flor, el hábito de crecimiento (Debouck & Hidalgo, 1984) y el área foliar. A la cosecha se registró el color primario y secundario de la semilla (Munsell color Company, 1977), brillantez, patrón de moteado y forma (IBPGR, 1982). Luego, se midió largo, ancho y grosor de semilla (Espinoza-Pérez *et al.*, 2015) y se clasificó en tamaños (Singh, 1989; Singh *et al.*, 1991).

Análisis estadístico

La información se registró en Excel (MS-2010). En las variables cualitativas se estimó la frecuencia relativa de cada clase para cada región de origen de la colecta y grupo etnolingüístico. Con la información cuantitativa se

registered. Quantitative data were subjected to principal component analysis (PCA) by using the statistical software SAS® version 9.0.

efectuó un análisis de componentes principales (PCA) con el programa estadístico SAS® versión 9.0.

Results and Discussion

All regions of origin of bean germplasm showed several seed colors, mixtures or 'ensaladilla' (mixture type which includes till eight seed types) which belongs to Mixes. Ethnolinguistic groups that showed the highest diversity of seed colors were Mazatecos in Cañada and Mixes at Sierra Norte. Seed coat colors more commons were yellow (5), black (1), and red (3) and purple (2) tonalities. Mottle pattern more frequently was absent for most of the regions, followed by the pattern 'splashed' dots. Region Mixteca presented the highest variation on

Resultados y Discusión

En todas las regiones de origen del germoplasma hubo varios colores, mezclas o tipo ensaladilla de hasta ocho colores diferentes de semilla, como las pertenecientes a los Mixes. Los grupos etnolingüísticos que presentaron mayor diversidad de colores fueron Mazatecos en Cañada y Mixes en la Sierra Norte. Los colores de testa más frecuentes fueron amarillo (5), negro (1), y tonalidades de rojo (3) y morado (2). El patrón de moteado más frecuente fue ausente para casi todas las regiones y, enseguida, la presencia de puntitos 'salpicados'. La región Mixteca presentó la mayor variación en patrón de moteado, mientras que en Istmo y Sierra Sur

Table 1.
Frequencies of qualitative traits among bean populations from Oaxaca's farmers by region and ethno-linguistic group.

Tabla 1.
Frecuencia de las características cualitativas entre poblaciones de frijol de agricultores oaxaqueños por región y grupo etnolingüístico.

Origin of populations	Brightness		Primary color of seed		Secondary color of seed		Flower color		Growth habit		Hypocotyl color		Mottled pattern		Shape	
	Class	FR(%)	Class	FR (%)	Class	FR(%)	Class	FR(%)	Class	FR(%)	Class	FR(%)	Class	FR(%)	Class	FR(%)
Cañada (Mazatecos)	1	3.3	5	66.6	A	63.3	2	6.67	3	23.3	1	26.6	0	83.3	1	46.7
	2	96.6	3	13.3	1	23.3	5	33.3	4	76.6	5	40.0	4	10.0	2	23.3
			Others (3)	20.0	Others (3)	13.3	6	60.0			7	33.3	Others (2)	6.7		
Istmo (Zapotecos)	1	100	1	77.7	A	100	1	22.2	1	100	1	26.6	0	100	3	22.2
	2		5	22.2			6	77.7			2	40.0			5	33.3
			Others				7	33.3			Others		44.4			
Mixteca (Mixtecos)	0	9.0	3	30.0	A	89.0	1	75.0	2	6.0	1	61.0	0	91.0	2	41.0
	1	16.0	1	28.0	5	6.0	6	16.0	4	94.0	4	9.0	4	3.0	5	20.0
			Others (3)	42.0	Others (2)	5.0	3	9.0			Others (4)	29.6	Others (3)	6.0	Others (3)	39.0
Sierra Norte (Mixe)	1	15.7	2	26.3	A	57.8	1	10.5	3	36.8	1	15.7	0	75	1	10.5
	2	84.2	5	42.1	1	31.5	4	84.2	4	63.1	7	84.2	3	15	2	31.6
			Others (3)	31.5	5	10.5	6	5.2					Others (2)	10	3	57.8
Sierra Norte (Zapotecos)	1	22.7	7	31.8	0	86.3	4	27.2	4	100	4	36.3	0	86.4	2	72.7
	2	77.2	5	22.7	1	9.0	6	72.7			5	22.7	8	4.5	4	13.6
			Others (3)	45.4	5	4.5			Others (2)	40.9	9	9.1	Others (2)	13.6		
Sierra Sur (Zapotecos)	0	38.1	1	71.4	A	100	1	4.7	4	100	1	19.0	0	100	5	38.1
	1	23.8	4	14.2			6	95.2			5	14.2			3	33.3
			Others (2)	14.2			7	66.6			Others (2)	28.2				
Valles Centrales (Zapotecos)	0	84.6	1	46.1	A	84.6	1	53.8	2	53.8	3	53.8	1	92.3	5	38.5
	2	15.3	5	53.8	2	15.3	6	46.1	4	46.1	5	15.3	7	7.7	4	30.8
			Others (2)				7	30.7			Others (2)	30.8				

Brightness: 0= matte, 1= brilliance, 2= both; Primary and secondary seed color (Munsell color Company, 1977): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7; flower color: 1, 2, 3, 4, y 5; growth habit: 1= determined type I, 2= determined type II, 3= in-determined type III, 4= in-determined type IV; hypocotyl color 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; mottled patterns 0, 1, 3, 4, 7, 8, 9; shape (IBPGR, 1982): 1, 2, 3, 4, 5.

Brillo: 0 = mate, 1 = brillo, 2 = ambos; Color de semilla primario y secundario (Munsell color Company, 1977): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7; color de la flor: 1, 2, 3, 4, y 5; hábito de crecimiento: 1 = tipo I determinado, 2 = tipo II determinado, 3 = tipo III no determinado, 4 = tipo IV no determinado; color de hipocotilo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; patrones moteados 0, 1, 3, 4, 7, 8, 9; forma (IBPGR, 1982): 1, 2, 3, 4, 5.

mottled patterns, while Istmo and Sierra Sur reported bean populations with one single color of seeds. All regions presented populations with shiny seed coat, populations with matte seed coat were found at Mixteca and Sierra Sur regions. The other populations maintain seed mixtures of shiny and matte seed coats. Purple was the most frequent color of flowers and hypocotyls; the most common growth habit was indeterminate-climber (type IV) while seed shape was variable among regions (Table 1).

Seeds with the largest weight and thickness were from Mixteca while the smallest were from Istmo. Bean populations of Zapoteca ethnicity from Sierra Norte showed the highest seed length while collections from Mixe's communities of Sierra Norte reported the highest thickness. Populations from Cañada and Mixteca exhibited the greatest variation in 100-seeds weight and the lowest variation was found in beans of Zapotecas from Valles Centrales. These last were the earliest accessions to flowering (76 days after sowing) while accessions from Mixes were the latest (102 days). Days to emergence varied from 4 to 5 days after sowing among regions and the first trifoliate leaf was produced to 25 days after sowing on average (Table 2).

solo se encontraron poblaciones con un color. En todas las regiones existían poblaciones con semillas de testa brillante; poblaciones con testa mate únicamente se encontraron en la Mixteca y Sierra Sur. En las otras poblaciones se mantenían mezclas de semillas con testa brillante y mate. El color de flor y del hipocótilo más frecuente fue el morado; el hábito de crecimiento más frecuente fue el indeterminado trepador (tipo IV) y la forma de la semilla fue variable entre regiones (Tabla 1).

Las semillas con peso y grosor mayor fueron de la Mixteca y las más pequeñas del Istmo. Las poblaciones de frijol de los grupos Zapoteca de la Sierra Norte presentaron mayor longitud de semilla y las colectadas en las comunidades Mixes de la Sierra Norte presentaron mayor grosor. Las poblaciones de Cañada y Mixteca exhibieron mayor variación en peso de 100 semillas y la menor variación el germoplasma de los Zapotecas de Valles Centrales. Estas últimas también fueron precoces a la floración (76 días después de la siembra) y las de los Mixes fueron las más tardías (102 días). En cuanto a emergencia, la variación fue de 4 a 5 días entre regiones y un promedio de 25 días para mostrar hojas trifoliado (Tabla 2).

El ACP explicó 90 % de la variación total observada en los dos primeros componentes principales (PCs). En el primer PC, área foliar (0.99), peso de 100 semillas (0.062) y días

Table 2.
Averages of morphological and agronomical quantitative traits in bean populations grouped by region and ethno-linguistic group origins.

Tabla 2.
Comportamiento medio de variables morfológicas y agronómicas cuantitativas, en poblaciones de frijol agrupadas por región y grupo etnolingüístico.

Traits	Cañada	Istmo	Mixteca	Sierra Norte		Sierra Sur	Valles Centrales	Controls
	Mazateco	Zapoteco	Mixteco	Mixe	Zapoteco	Zapoteco	Zapoteco	
100-seed weight	35.13	19.4	36.03	35.2	31.6	26.9	32.3	17.3
Length	7.76	6.00	8.27	7.5	8.01	7.57	8.02	5.55
Width	3.73	2.75	4.85	4.7	3.91	3.42	3.90	2.35
Thickness	2.08	1.41	2.50	2.5	2.15	1.5	1.60	0.75
No. of colors	7.5	2.2	2.9	8.0	4.4	2.1	3.2	1.0
Days to flowering	94.0	--	85.0	102.0	88.4	95.9	76.2	73.0
Days to emergence	4.5	4.7	4.7	5.0	5.0	4.8	5.0	5.0
Leaf area	69.5	92.1	107.3	67.6	106.1	97.7	109.3	70.2
Days to primary leaves	10.2	9.5	8.18	8.5	9.4	8.6	8.5	11.5
Days to first trifoliate leaves	17.0	14.0	13.7	13.0	13.8	13.5	11.0	14.5
Days to third trifoliate leaves	21.2	23.0	20.7	20.0	20.2	21.6	19.7	32.0

The ACP explained 90 % of the total variance observed in the first two principal components (PCs). At first PC leaf area (0.99), 100-seeds weight (0.062) and days to pod formation (0.031) showed the highest descriptive value, while for the second PC the highest descriptive variables were 100-seeds weight (0.30); days to formation (0.42), filling (0.616), and pod maturity (0.58). The spatial distribution

a formación de vainas (0.031) presentaron mayor valor descriptivo, mientras que en el segundo PC las de mayor valor fueron peso de 100 semillas (0.30), días a formación (0.42), llenado (0.616) y maduración de vainas (0.58). La distribución espacial de las poblaciones por región de origen, indican la alta variabilidad en características de semillas, área foliar y etapas fisiológicas (Figura 2a).

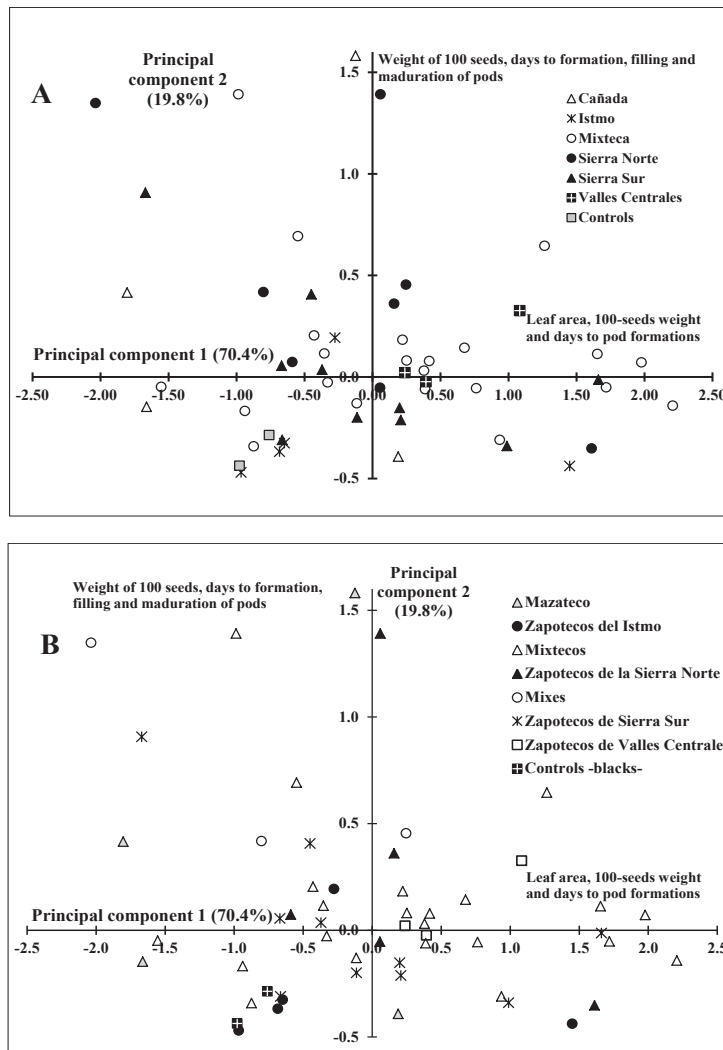


Figure 2. Dispersion of bean germplasm based on the principal components 1 and 2 of the principal component analysis of morphologic and agronomic data, classified by Oaxaca region (A) or ethno-linguistic group (B) origins.

Figura 2. Dispersión del germoplasma de frijol en función de los dos primeros componentes del análisis de componentes principales de datos morfológicos y agronómicos, clasificados por región de origen en Oaxaca (A) y grupo etnolingüístico (B).

of bean populations by region of origin indicated the high variability on seed traits, leaf area, and physiological stages (Figure 2a).

Phenotypic diversity on seedling and seed traits as well as on phenological phases are the reflection of bean diversity preserved by the farmers of Oaxaca. The PCA based on ethnolinguistic group indicated similitude of germplasm of Zapotecos from Valles Centrales, Sierra Norte, and Sierra Sur. However, Zapotecos from Istmo have germplasm a little different from those mentioned (quadrant IV, Figure 2b). Bean populations cultivated by Mazatecos and Mixes were more dispersed. In addition, there were differences among communities and within ethnic groups regarding the way of conservation, selection and maintaining their bean diversity; and these differences were expressed on traits evaluated in this work.

The morphological and physiological descriptions of one bean collection from the state of Oaxaca, Mexico indicated variability on qualitative and quantitative traits and showed the differences among regions of origin and ethnic groups that conserved them. Phenotypic differentiation started since the identification with a name or trait supplied by the farmer; for example, beans of 'milpa' (blacks) or 'ejotero' and 'grueso' ('thick' bean) (*P. coccineus*) showing evident phenotypic differences. Also outstand 'chivo' (goat) beans (black seeded) from Sierra Sur and Valles Centrales; 'machetudo' ('machete') beans (Mixteca; purple seeds) or 'cuarenteño' (forty days) (Istmo, yellow seeds). Espinosa-Pérez et al. (2015) classified in 13 groups of bean genotypes based on seed colors and local names used by farmers in order to distinguish bean germplasm from several regions of Mexico, including Oaxaca, and where the more frequent were genotyped with seed colors yellow, 'ensaladilla', red, black and 'vaquita' (white or beige seeds with black spots).

Bean populations from Mixteca showed large seeds and highly variable on colors and mottled patterns, while populations with small seeds and less variable in colors come from Istmo and Sierra Sur regions. Morpho-agronomic variables that differentiated populations were leaf area; 100-seeds weight; days to pod formation, pod filling, and pod maturity. Espinoza-Pérez et al. (2015) reported that 100-seeds weight and seed thickness can discriminate bean populations from Oaxaca's *Phaseolus* gene pools. Aquino-Bolaños et al. (2016) indicated that small seeds with low specific weight are also found in Oaxaca's germplasm and additionally, bean populations with dark seed coats showed the highest levels of monomeric anthocyanins.

La diversidad fenotípica de plántulas, fases fenológicas y semillas expresa la diversidad de frijol preservada por los agricultores oaxaqueños. El PCA con base en grupo etnolingüístico indica similitudes en el germoplasma de los Zapotecos de Valles Centrales, de Sierras Norte y Sur. No obstante, los Zapotecos del Istmo tienden a diferenciarse (cuadrante IV, Figura 2b). Las poblaciones cultivadas por Mazatecos y Mixes fueron más dispersas. Además, hubo diferencias entre comunidades y dentro de los grupos indígenas respecto a la manera en que conserva, selecciona y mantiene su diversidad de frijol, y esto se expresó en los caracteres evaluados en este trabajo.

La descripción morfológica y fisiológica de una colección de frijol oaxaqueño indica la variabilidad en caracteres cualitativos y cuantitativos, y muestran las diferencias entre regiones de origen de las poblaciones y de los grupos indígenas que las conservan. La diferenciación fenotípica inicia desde la identificación con un nombre o característica reproducible por el agricultor. Por ejemplo, el frijol de milpa (negro) y el ejotero y grueso (*P. coccineus*), con diferencias fenotípicas evidentes. También, destacan el frijol chivo (negro) de la Sierra Sur y de los Valles Centrales, el frijol machetudo (Mixteca; morado) o el cuarenteño (Istmo, amarillo). Espinosa-Pérez et al. (2015) clasificaron en 13 grupos de genotipos de frijol de acuerdo con los colores y nombres locales usados por los agricultores para distinguir el germoplasma en varias regiones de México, entre ellas Oaxaca, donde los más frecuentes fueron amarillo, ensaladilla, rojo, negro y vaquita.

Las poblaciones de frijol de la Mixteca son de mayor tamaño y de alta variación en rasgos de semilla (colores, patrones de moteado) mientras que las poblaciones con semilla más pequeña y menos variable en colores provienen del Istmo y Sierra Sur. Las variables morfo-agronómicas que ayudaron a diferenciar las poblaciones fueron área foliar, peso de 100 semillas, días a formación de vainas, llenado y maduración de vainas. Espinoza-Pérez et al. (2015) reportaron que el peso de 100 semillas y el grosor de la semilla discriminan poblaciones en acervos oaxaqueños de *Phaseolus*. Aquino-Bolaños et al. (2016) reportan semillas pequeñas con menor peso específico para Oaxaca y, además, las poblaciones de frijol con semillas de colores oscuros presentaron niveles más altos de antocianinas monoméricas.

En este estudio, y de manera general, no se detectó relación entre origen y el agrupamiento con base en dichos caracteres, contrario a lo señalado por Rocandio et al.

In this work, it was not detected any relationship between origin and clustering based on seed traits, contrary to that was reported by Rocandio *et al.* (2009). However, bean germplasm was clustered in accordance with ethnicity origins as Sierra Norte, and Zapotecas and Mixes, while the populations from Mixteca were more variable. Germplasm from Mixteca showed large seeds and were morphologically variables. Mixtecos have a higher number of local terms or classifications to its local bean diversity, compared with Mazatecos or Mixes.

Seed management practices for sowing and culture are different among ethnic groups; for example, Mixes mix up eight colors seeds (genotypes) to establish their 'milpas' every year. Mazatecos from Cañada and Mixes from Sierra Norte uses a higher color seed diversity of beans, outstanding yellow, black, red, and purple. In this work predominated genotypes with purple flowers and hypocotyls, as well as growth habit IV or called as indeterminate climber growth habit. Populations from Valles Centrales were earlier than the germplasm of Mixes from Sierra Norte. At regional markets, the most common seed colors are related to their commercial, cultural, and/or culinary value, either dark or light seed coat colors (Rocandio *et al.*, 2009).

Chávez-Servia *et al.* (2016) reported 92 days to flowering on average for bean populations from Sierra Sur, 84.7 days in germplasm from Valles Centrales, and 44.3 days for beans from Mixteca. In this work, flowering happened to 95, 76, and 85 days for germplasm from each origin, respectively. Bean populations from Sierra Norte presented 88 days to flowering while beans from Zapotecos and Mixes showed 88-102 days, respectively.

Soleri *et al.* (2013) detected *P. coccineus* populations from Sierra Norte of Oaxaca and cultivated by Zapoteca ethnicity. In this work, ayocote beans were detected in the Mixe ethnicity in the same region, too. Likewise, we found that seed with the lowest weight belongs to *P. vulgaris* (30 g per 100 seeds), followed by *P. coccineus* (42 g), and *P. dumosus* (52 g). Worthington *et al.* (2012) reported that the genetic race of each accession is associated with the range of altitude where the genotype is cultivated, derived from its strong adaptation to specific agroecological niches.

The PCA performed two groups of genotypes in accordance to seed traits, one includes beans with small seeds and black seed coats that are commonly cropping as a monoculture, with determined growth habit; this germplasm is similar to

(2009). Sin embargo, el germoplasma se agrupó con base en la etnia de origen como Sierra Norte y Zapotecas y Mixes; mientras que las poblaciones de la Mixteca fueron las más variables. De este último origen, las semillas son de mayor tamaño y altamente variables. Los Mixtecos tienen mayor número de vocablos o clasificaciones locales de su diversidad de frijol, en comparación con los Mazatecos o Mixes.

Las prácticas de manejo de semilla para siembra y cultivo son diferentes entre grupos indígenas; por ejemplo, los mixes mezclan semillas de hasta ocho colores para la siembra. Los Mazatecos de Cañada y Mixes de Sierra Norte manejan mayor diversidad de colores, destacando amarillo, negro, rojo y morado. Predominaron el color de flor y de hipocótilo morado, así como el hábito de crecimiento IV o indeterminado trepador. Las poblaciones de Valles Centrales fueron más precoces que las de los Mixes de la Sierra Norte, que son más tardíos. En los mercados regionales los tipos o colores de semilla más frecuentes se vinculan con su valor comercial, cultural y culinario, ya sean colores oscuros o claros (Rocandio *et al.*, 2009).

Chávez-Servia *et al.* (2016) reportaron un promedio de 92 días a floración para poblaciones de frijol de la Sierra Sur, 84.7 días en germoplasma de Valles Centrales y 44.3 días para el originario de la Mixteca. En este estudio se estimaron 95, 76, y 85 días respectivamente. Para poblaciones de Sierra Norte se reportaron 88 días para la floración, mientras que se registraron 88-102 días para poblaciones de los Zapotecos y Mixes, respectivamente.

Soleri *et al.* (2013) identificaron en la Sierra Norte de Oaxaca poblaciones de *P. coccineus* cultivadas por la etnia Zapoteca. En este estudio se detectaron poblaciones de frijol ayocote de la etnia Mixe de la misma región. Así mismo, semillas de menor peso pertenecieron a *P. vulgaris* (30 g por 100 semillas), le siguen en tamaño *P. coccineus* (42 g) y *P. dumosus* (52 g). Worthington *et al.* (2012) encontraron que la raza genética a la que pertenece cada accesión se asocia con la altitud en la que se cultiva, derivado de la fuerte adaptación del germoplasma a sus particulares nichos agroecológicos.

El PCA formó dos grupos de genotipos de acuerdo con rasgos de semilla, uno incluyó frijoles con semillas pequeñas de color negro que se siembran en monocultivo y hábito de crecimiento determinado; este germoplasma es similar a los testigos Negro Jamapa y Comapa. El otro grupo incluyó germoplasma que presenta mayor diversidad

controls Negro Jamapa and Comapa. The other groups included that germplasm showing less seed color and size diversity, as well as indeterminate growth habit (Soleri *et al.*, 2013; Worthington *et al.*, 2012; Espinoza-Pérez *et al.*, 2015).

Beans from Oaxaca are one result of *in situ* conservation by local farmers, one process conducted by generations of agricultural families with limited economic resources to which bean grain constitutes the base of their feeding. In addition to the conservation of genetic resources, farmers preserve local knowledge associated with the cultural practices, grain conservation, and criteria for seed selection for the next crop cycle (Espinoza-Pérez *et al.*, 2015). Current diversity was produced by selection of beans for specific agricultural systems, increasing its potential genetic value (Singh *et al.*, 1991; Soleri *et al.*, 2013).

Las milpas y backyards (home gardens) are spaces for bean production in Oaxaca, where farmers host the most of bean genetic diversity, although this diversity is not yet fully studied. The diversity is maintained and enriched with farmer's practices as seed exchange (Aguilar-Støen *et al.*, 2009; Espinoza-Pérez *et al.*, 2015) and the likely genetic flux among *P. vulgaris*, *P. coccineus* and *P. dumosus* within the spaces where those species converge. These practices expand the diversity managed by each Farmer and have positive effects as the likely resilience to climate change or either, changes of soil use, erosion, or rainfall patterns (Aguilar-Støen *et al.*, 2009).

Bean domestication increased the seed size, changed growth habit from indeterminate to determinate and reduced pod dehiscence; then it was produced genetic variability on size, shape, and color of seeds (Peña-Valdivia *et al.*, 2012).

Beans from four regions of the state of Oaxaca showed significant differences on flowering, pod length or the number of seeds per pod; this difference was higher among populations from Mixteca compared with those from Valles Centrales and Sierra Norte (Chávez-Servía *et al.*, 2016). Singh (1988) reported a 100-seeds weight of 27.5 g in bean germplasm from Oaxaca, and Espinoza-Pérez *et al.* (2015) informed more than 20 g per 100-seeds and seed coat mostly black. Worthington *et al.* (2012) described bean populations from one community at Sierra Juárez de Oaxaca differentiating germplasm of *P. vulgaris*, *P. dumosus* and *P. coccineus* species based on seed size, flower color, type of emergence (epigeal or hypogeal) or local classification system on Zapoteca's language.

de colores y tamaños de semilla y con hábito de crecimiento indeterminado (Soleri *et al.*, 2013; Worthington *et al.*, 2012; Espinoza-Pérez *et al.*, 2015).

Los frijoles de Oaxaca son producto de la conservación *in situ* realizada por los agricultores en sus comunidades por generaciones, frecuentemente familias de escasos recursos económicos en las que el grano constituye la base de su alimentación. Además de conservar los acervos genéticos, se preserva el conocimiento local asociado con las prácticas de cultivo, beneficio de grano y criterios de selección de semilla para la siguiente siembra (Espinoza-Pérez *et al.*, 2015). La diversidad actual es producto de la selección para sistemas agrícolas específicos, lo que incrementa su valor genético potencial (Singh *et al.*, 1991; Soleri *et al.*, 2013).

Las milpas y traspatios son espacios de producción de Oaxaca donde se alberga la mayor diversidad genética de frijol, aunque aún no se estudia plenamente. Esta diversidad se mantiene y se enriquece con prácticas de los agricultores como el intercambio de semillas (Aguilar-Støen *et al.*, 2009; Espinoza-Pérez *et al.*, 2015) y el posible flujo genético entre *P. vulgaris*, *P. coccineus* y *P. dumosus*, en los espacios donde convergen. Estas prácticas amplían la diversidad que maneja cada agricultor y tienen efectos positivos como la probable resiliencia a cambio climático o bien, cambios de uso de suelo, erosión y regímenes de precipitación (Aguilar-Støen *et al.*, 2009).

La domesticación del frijol incrementó el tamaño de semilla, cambió el hábito de crecimiento indeterminado a determinado y redujo la dehiscencia de la vaina; así se generó variabilidad en el tamaño, forma y color de semillas (Peña-Valdivia *et al.*, 2012).

Los frijoles de cuatro regiones del estado de Oaxaca presentan diferencias significativas en los días para iniciar la floración, longitud de la vaina y semillas por vaina, esta diferencia fue mayor entre las poblaciones de la Mixteca respecto a las de Valles Centrales y Sierra Norte (Chávez-Servía *et al.*, 2016). Singh (1988) determinó pesos de 27.5 g/100 semillas en germoplasma Oaxaqueño, mientras que Espinoza-Pérez *et al.* (2015) reportaron valores mayores a 20 g y predominancia de color negro de la testa. Worthington *et al.* (2012) describieron las poblaciones de frijol de una comunidad de la Sierra Juárez de Oaxaca y diferenciaron las especies *P. vulgaris*, *P. dumosus* y *P. coccineus* por tamaño de la semilla, color de flor, tipo de emergencia y el sistema clasificatorio local en lengua Zapoteca.

Conclusions

Morpho-agronomic variability analyses of the bean collection from different regions of Oaxaca, Mexico showed significant differences among and within populations, and these differences were less frequent among regions of origin. The identified groups were Mixteca-Istmo, Sierra Norte-Mixteca, and Cañada-Sierra Sur-Valles Centrales regions.

Acknowledgments

The first author is grateful for the scholarships provided by CONACYT and BEIFI-IPN program for her M.Sc. studies. This work was financed by CONACYT (Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2015, no. 1119).

References

- Aguilar-Støen, M., Moe, S. R. and Camargo-Ricalde, S. L. (2009). Home gardens sustain crop diversity and improve farm resilience in Candelaria Loxicha, Oaxaca, Mexico. *Human Ecology*, 37: 55-77. <http://doi.org/10.1007/s10745-008-9197-y>
- Aquino-Bolaños, E., García-Díaz, Y., Chavez-Servia, J., Carrillo-Rodríguez, J., Vera-Guzmán, A. and Heredia-García, E. (2016). Anthocyanins, polyphenols, flavonoids and antioxidant activity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28:1-8. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-02-147>
- Castillo-Mendoza, M., Ramírez-Vallejo, P., Castillo-González, F. and Miranda-Colín, S. (2006). Diversidad morfológica de poblaciones nativas de frijol común y frijol ayocote del oriente del Estado de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29: 111-119. <https://www.redalyc.org/pdf/610/61029203.pdf>
- Debouck, D. & Hidalgo, R. (1984). Morfología de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/81884/morfologia7eba331e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez-Servia, J. L., Heredia-García, E., Mayek-Pérez, N., Aquino-Bolaños, E. N., Hernández-Delgado, S., Carrillo-Rodríguez, J. C., Gill-Langarica, H. R. and Vera-Guzmán, A. M. (2016). Diversity of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.), Landraces and the Nutritional Value of their Grains. Grain Legumes, Goyal, A. (ed.), *InTech. Rijeka*, Croacia. <https://doi.org/10.5772/63439>
- Espinosa-Pérez, E. N., Ramírez-Vallejo, P., Crosby-Galván, M. M., Estrada-Gómez, J. A., Lucas-Florentino, B. and Chávez-Servia, J. L. (2015). Clasificación de poblaciones nativas de frijol común del centro-sur de México por morfología de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29: 29–38. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n1/v38n1a5.pdf>
- Gepts, P. (2014). The contribution of genetic and genomic approaches to plant domestication studies. *Current Opinion in Plant Biology*, 18: 51-59. <http://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.02.001>
- Hernández-Delgado, S., Muruaga-Martínez, J. S., Vargas-Vázquez, M. L., Martínez-Mondragón, J., Chávez-Servia, J. L., Gill-Langarica, H. R. and Mayek-Pérez, N. (2015). Advances in Genetic Diversity Analysis of *Phaseolus* in México. Molecular approaches to genetic diversity. Caliskan, M., Cevahir-Oz, G., Kavakli-Halia, I., and Ozcan, B. (eds), *InTech. Rijeka*, Croacia. <http://doi.org/10.5772/60029>
- Hernández-López, V. M., Vargas-Vázquez, M. L., Muruaga-Martínez, J. S., Hernández-Delgado, S. and Mayek-Pérez, N. (2013). Origen, domesticación y diversificación del frijol común. Avances y Perspectivas. *Revista Fitotecnia*

Conclusiones

El análisis de la variabilidad morfo-agronómica de una colección de frijol de diferentes regiones de Oaxaca, México mostró que hay diferencias significativas entre y dentro de poblaciones, y que son menos frecuentes entre regiones de origen. Los grupos identificados fueron Mixteca-Istmo, Sierra Norte-Mixteca y Cañada-Sierra Sur-Valles Centrales.

Agradecimientos

La primera autora agradece las becas para sus estudios de posgrado al CONACYT y programa BEIFI-IPN. Este trabajo fue financiado por el CONACYT (Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2015, no. 1119).

- Mexicana*, 36: 95–104. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802013000200002
- International Board for Plant Genetic Resources [IBPGR]. (1982). *Phaseolus vulgaris* descriptors. IBPGR Secretariat. Rome, Italy, 32 p. https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Phaseolus_vulgaris_descriptors_160.pdf
- Munsell Color Company. (1977). Munsell color charts for plant tissues. Baltimore, Md: Munsell Color.
- Peña-Valdivia, C. B., Aguirre-Rivero, J. and Arroyo-Peña, V. B. (2012). El frijol silvestre: Síndrome de domesticación. Colegio de Postgraduados. Guadalajara, México.
- Rocandio, M. P., Ramírez-Vallejo, P., Castillo-González, F., Miranda-Colín, S. and Gómez-Estrada, J. (2009). Diversidad en características de interés agronómico de poblaciones nativas de frijol común en asociación con maíz. En: Memoria del X Simposio Internacional y V Congreso Anual de Agricultura Sostenible. Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible, A.C. (ed.). 9-14 de noviembre. Chiapas, México.
- Rosales-Serna, R., Acosta-Gallegos, J. A., Muruaga-Martínez, J. S., Hernández-Casillas, J. M., Esquivel-Esquivel, G. and Pérez-Herrera, P. (2004). Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Dirección Agrícola, INIFAP-CIRNE-CEVAMEX. Libro técnico. Núm. 6.
- Singh, S. P. (1988). Gene pools in cultivated dry bean. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* 31: 180-182. <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND88014231/PDF>
- Singh, S. P. (1989). Patterns of variation in cultivated common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae) *Economic Botany*, 43: 39-57. <https://www.jstor.org/stable/4255132>
- Singh, S. P., Gepts, P. and Debouck, D. G. (1991). Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). *Economic Botany*, 45: 379-369. <http://doi.org/10.1007/BF02887079>
- Soleri, D., Worthington, M., Aragón-Cuevas, F., Smith, S. E. and Gepts, P. (2013). Farmers' Varietal Identification in a Reference Sample of Local *Phaseolus* Species in the Sierra Juárez, Oaxaca, Mexico. *Economic Botany*, 67: 283–298. <http://doi.org/10.1007/s12231-013-9248-1>
- Worthington, M., Soleri, D., Aragón-Cuevas, F. and Gepts, P. (2012). Genetic Composition and Spatial Distribution of Farmer-managed Bean Plantings: An Example from a Village in Oaxaca, Mexico. *Crop Science*, 52: 1721-1735. <http://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0518>