

Polinización biótica en *Phaseolus coccineus*: Impacto en los componentes del rendimiento y características de semilla

Biotic pollination in *Phaseolus coccineus*: Impact on yield components and seed characteristics

Karina Alejandra Cué-Hernández¹ , Abel Gil-Muñoz^{1*} , Armando Aguirre-Jaimes² , Pedro Antonio López¹ , Oswaldo Rey Taboada-Gaytán¹ 

¹Colegio de Postgraduados Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla, 205, Santiago Momoxpan, CP. 72760. San Pedro Cholula, Puebla, México.

²Instituto de Ecología, A. C. Carretera Antigua a Coatepec, 351, El Haya, CP. 91070. Xalapa, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: gila@colpos.mx

Artículo científico

Recibido: 31 de agosto 2024

Aceptado: 17 de julio 2025

RESUMEN. La polinización biótica mejora el rendimiento de cultivos como *Phaseolus coccineus* (frijol ayocote), una leguminosa de importancia alimentaria en México. Aunque algunos estudios han evaluado el efecto de la exclusión de polinizadores en esta especie, no se ha explorado si el sistema de manejo agronómico o el color de la flor tienen efectos adicionales. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar la importancia de la polinización biótica y precisar el efecto de sistemas de manejo y colores de flor contrastantes sobre los componentes del rendimiento y las características de semilla en *P. coccineus*. Se estudiaron las combinaciones de dos sistemas (tecnificado y tradicional) y dos variedades con flores de color distinto (blanca y roja), en las que se compararon plantas con y sin acceso de polinizadores. Se midieron 14 variables, las cuales se analizaron mediante la prueba de rangos Mann-Whitney, análisis de conglomerados y de componentes principales. En todas las combinaciones manejo-variedad, las plantas con acceso de polinizadores desarrollaron 97% más frutos y semillas normales, con respecto a plantas donde se excluyeron polinizadores. Atributos como longitud y ancho de semillas fueron mayores en plantas sin acceso a polinizadores en ambos sistemas agronómicos y variedades. La interacción con polinizadores y no el sistema de manejo o el color de flor, fue el principal factor explicativo. La polinización biótica produjo efectos benéficos en los componentes de rendimiento, resaltando su importancia para frijol ayocote y la necesidad de implementar prácticas agrícolas que conserven este servicio ecosistémico de manera sostenible.

Palabras clave: Ayocote, manejo agronómico, polinizadores, productividad.

ABSTRACT. Biotic pollination enhances yields of crops such as *Phaseolus coccineus* (runner bean), an important food legume in Mexico. Although some studies have assessed the effect of excluding pollinators in this species, it remains unclear whether agronomic management or flower color have additional effects. Thus, the objective of this study was to determine the significance of biotic pollination and to assess the effect of contrasting management systems and flower colors on the yield components and seed characteristics in *P. coccineus*. We examined the combinations arising from two systems (technified and traditional) and two varieties with flowers of different color (white and red), and compared plants with and without access of pollinators. We measured fourteen variables, which were analyzed by the Mann-Whitney rank test, cluster analysis, and principal component analysis. In all the management-variety combinations, plants with access of pollinators developed 97 % more normal fruits and seeds, compared to plants without access. Attributes such as seed length and width were greater in plants without pollinator access in both agronomic systems and varieties. The interaction with pollinators, and not management system or flower color, was the main explicative factor. Biotic pollination had beneficial effects on yield components, underscoring its importance for runner bean and highlighting the need to implement agricultural practices that conserve this ecosystem service in a sustainable manner.

Keywords: Runner bean, agronomic management, pollinators, productivity.

Como citar: Cué-Hernández KA, Gil-Muñoz A, Aguirre-Jaimes A, López PA, Taboada-Gaytán OR (2025) Polinización biótica en *Phaseolus coccineus*: Impacto en los componentes del rendimiento y características de semilla. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(2): e4301. DOI: 10.19136/era.a12n2.4301.

INTRODUCCIÓN

La forma en la que ocurre la polinización en los cultivos es variada, por ejemplo, especies como *Oryza sativa* (arroz), *Triticum aestivum* (trigo), *Avena sativa* (avena), *Phaseolus vulgaris* (frijol común) y *Glycine max* (soya) no requieren de vectores para llevarla a cabo, ya que son esencialmente autógamos (Sood *et al.* 2022, Cunha *et al.* 2023), mientras que otras, como *Zea mays* (maíz), *Saccharum officinarum* (caña de azúcar) y varias especies de gramíneas, dependen del viento para polinizar sus flores (Pleasants *et al.* 2001, Todd *et al.* 2020, Pan *et al.* 2022). Existen, por otra parte, especies que requieren vectores animales para transportar los granos de polen, como insectos (abejorros, abejas, avispas, mariposas, escarabajos y moscas, entre otros) y/o vertebrados (colibríes, reptiles, murciélagos y otros mamíferos) (SADER *et al.* 2021). En esta modalidad de polinización (polinización biótica) quedan incluidos más de tres cuartas partes de los principales cultivos alimenticios del mundo (Eilers *et al.* 2011, Smith *et al.* 2022).

Para los cultivos que dependen de polinizadores, la presencia de éstos no solo es fundamental para asegurar su supervivencia y el mantenimiento de la diversidad genética, sino también para mejorar su productividad (Shivanna *et al.* 2020, Tanda 2022). Los trabajos de exclusión de polinizadores han demostrado la magnitud de su importancia; por ejemplo, en *Helianthus annuus* (girasol), Perrot *et al.* (2019) encontraron que la presencia de polinizadores incrementó el rendimiento (número de semillas) en 40.0% a nivel parcela. En cultivos de *Pyrus communis* (pera) y *Malus domestica* (manzana), la exclusión de polinizadores redujo considerablemente el promedio de cuajado de frutos en 50% para *P. communis* y hasta en 92% para *M. domestica* (Hünicken *et al.* 2021). En huertos de *Persea americana* (aguacate), el número de frutos en inflorescencias expuestas a insectos polinizadores fue siete veces mayor respecto a inflorescencias donde no se permitió el acceso de polinizadores (Carabalí-Banguero *et al.* 2018). En cultivos de *Fragaria x ananassa* (fresa), Wietzke *et al.* (2018) encontraron que la polinización por insectos aumentó la producción de frutos y la calidad de los mismos (mayor tamaño y peso, menor número de frutos con formas irregulares y de infestación por patógenos, como hongos); con ello se incrementó el valor comercial promedio en 92%.

La abundancia y diversidad de polinizadores se han reducido de manera importante a causa de factores como la pérdida y destrucción del hábitat (agricultura, desarrollo urbano, tala de árboles, minería, construcción de presas, entre otros.), cambio climático, desertificación, enfermedades, degradación ambiental, introducción de especies invasoras, contaminación química e intensificación agrícola (Wagner 2020). Aun cuando se han desarrollado investigaciones para evaluar y entender el impacto de estos factores a nivel mundial, se sabe poco de lo que ocurre en Latinoamérica y particularmente en México, donde varios de los cultivos son dependientes de polinizadores, por lo que resulta relevante generar información sobre las consecuencias de las modificaciones del ambiente sobre la polinización de plantas cultivadas (Sosenski y Domínguez 2018).

Dentro de las especies vegetales que forman parte importante de la alimentación en México destacan las del género *Phaseolus*. En el país se domesticaron cinco de ellas, específicamente *P. acutifolius* A. Gray (frijol tépari), *P. dumosus* Macfady (frijol gordo), *P. lunatus* L. (frijol lima), *P. vulgaris* L. (frijol común) y *P. coccineus* L. (frijol ayocote) (Schwember *et al.* 2017). Esta última especie

es la segunda del género en importancia económica y constituye una fuente de proteína de calidad a bajo costo (Ruíz-Salazar *et al.* 2019). Se cultiva principalmente en el Altiplano Central de Puebla (López-Báez *et al.* 2018), en sistemas que muestran un uso diferenciado de agroquímicos. *P. coccineus* presenta varias peculiaridades en comparación con las otras especies del género, una de ellas es el sistema de apareamiento, el cual se ha clasificado como mixto (entre autógamo y alógamo), con predominio del entrecruzamiento (Escalante *et al.* 1994). Los porcentajes de alogamia que se han reportado son variables: entre 20 y 50% para una variedad en Gran Bretaña (Blackwall 1971), entre 63 y 87% en poblaciones cultivadas de Morelos, México, y entre 47 y 91% en poblaciones silvestres (Búrquez y Sarukhán 1984). Entre los principales polinizadores de la especie se han citado a abejas, abejorros y colibríes (Búrquez y Sarukhán 1980).

Estudios realizados en Gran Bretaña (Kendall y Smith 1976) y Polonia (Koltowski 2004) demostraron que las flores de *P. coccineus* producen menos semillas por vaina cuando no hay polinizadores eficientes. Por otra parte, investigaciones hechas en Camerún, con diferentes variedades de *P. coccineus*, revelaron que la presencia de *Xylocopa calens* incrementó la producción de frutos entre 25.8 y 27.6% y el número de semillas normales por fruto entre 14.9 y 18.4%, en comparación con las visitas de otras abejas silvestres (*X. albiceps*, *Dactylurina staudingeri*, *X. torrida*, *X. nigrita*, *Chalicodoma cincta*, *Ch. rufipennis*, *Crocisaspidia chandleri*, *Thrinchostoma wissmanni* y *Lasioglossum sp.*) y *Apis mellifera* (Pando *et al.* 2011). En cuanto al efecto de *X. olivacea*, se encontró que su participación resultó en incrementos del 27.5 al 56.1% en la tasa de fructificación, de 45.4 al 74.4% en el número de semillas por fruto y de 66.3 al 89.4% en el porcentaje de semillas normales (Fohouo *et al.* 2014). Aun cuando en los trabajos previamente mencionados se estudió el efecto de la exclusión de polinizadores en los componentes del rendimiento de *P. coccineus*, ninguno de ellos evaluó si los resultados podían ser afectados por el color de la flor o el sistema de manejo agronómico. Con base en estos antecedentes, se planteó la presente investigación, la cual tuvo por objetivo determinar la importancia de la polinización biótica en los componentes del rendimiento y las características de las semillas de *P. coccineus* de dos variedades nativas con diferente color de flor, cultivadas bajo dos sistemas de manejo agronómico. Las hipótesis de trabajo fueron que las características de frutos y semillas serán favorecidas con las visitas de polinizadores y que el nivel de expresión de todos los componentes de rendimiento estudiados será mayor en el sistema de manejo tradicional y con acceso a polinizadores, independientemente del color de flor de la variedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en el poblado de San Andrés Calpan, localizado en el centro oeste del estado de Puebla, México. La comunidad se ubica en los 19° 06' 28" LN y 98° 27' 33" LO, a 2 430 msnm. El clima preponderante es el templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw₂), con precipitaciones de 900 a 1 000 mm (INEGI 2010).

Parcelas de estudio

Se eligieron dos parcelas de cultivo, con una superficie de 1 000 m² cada una, separadas 100 m entre sí por franjas de *Avena sativa* (avena) y *Zea mays* (maíz). En cada parcela se sembraron, bajo condiciones de temporal, dos variedades nativas de *P. coccineus*, recolectadas y seleccionadas como parte de un programa de fitomejoramiento que se desarrolla en el Altiplano Central de Puebla: Población 89 (flor roja y semilla negra) y Población 46 (flor y semilla blanca). Cada parcela se dividió en dos secciones a lo ancho y cuatro a lo largo, para formar ocho cuadrantes. Cada cuadrante estuvo formado por siete surcos de 22 m de largo y 0.75 m de ancho. La siembra se realizó el 30 de mayo de 2019, de forma tal que las dos variedades quedaran alternadas a lo largo y ancho de la parcela. Así, quedaron intercalados cuadrantes de la Población 89 con los de la Población 46. En todos los casos, a la siembra se depositaron dos semillas por mata, cada 50 cm.

Manejo agronómico

Ambas parcelas se fertilizaron a los 34 días después de siembra (dds) con la fórmula 60N-60P-00K (N-P₂O₅-K₂O); como fuentes, se emplearon fosfato diamónico (18-46-00) y urea (46-00-00). En una de las parcelas se dio un manejo agronómico tecnificado, consistente en la aplicación con una aspersora manual de un herbicida (bentazona), a una dosis de 2 L·ha⁻¹ a los 25 dds, para el control de la maleza y también de un insecticida (lambda cialotrina), a una dosis de 0.1 L·ha⁻¹, a los 61 y 100 dds para el control de insectos plaga (chapulines, *Melanoplus* sp.). En la otra parcela se dio un manejo agronómico tradicional, consistente en el control manual de la maleza y sin uso de insecticida.

Monitoreo de las condiciones ambientales

A partir de la información registrada por una estación climatológica ubicada en San Andrés Calpan (Estación 21167), cuyos datos se encuentran disponibles en la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2025), se determinaron las temperaturas extremas y precipitación ocurridas semanalmente durante el ciclo de cultivo. A partir de ello, se generó una figura de datos termopluviométricos.

Experimento de exclusión de polinizadores

Para evaluar el efecto de la dependencia de polinizadores en las variedades de *P. coccineus*, se diseñó un experimento en el cual, a los 67 días después de la siembra (dds), en cada una de las cuatro combinaciones de sistema de manejo – variedad [tecnificado – flor blanca (TECBL), tecnificado – flor roja (TECRO), tradicional – flor blanca (TRABL), tradicional – flor roja (TRARO)] se eligieron al azar 30 pares de plantas contiguas y sanas. Se cuidó que los individuos tuvieran un tamaño y desarrollo fenológico similar, además de que no presentaran flores abiertas. Se optó por esa cantidad de plantas con base en el número manejado en estudios de diversidad fenotípica (Vargas-Vázquez *et al.* 2011, López-Báez *et al.* 2018), el cual oscila entre 20 y 30 plantas en total por material estudiado.

Los 30 pares de plantas se distribuyeron entre los cuadrantes correspondientes a cada combinación. En este diseño pareado, a una planta se le colocó una estructura cilíndrica de malla metálica galvanizada (de 1.2 m de altura), cubierta totalmente con tela de tul (1 mm x 1 mm), para excluir la acción de los polinizadores; mientras que la otra planta quedó expuesta libremente a la interacción

con los mismos. Este arreglo se mantuvo hasta la cosecha (179 dds). Diversos estudios han demostrado que las mallas comúnmente utilizadas en estos experimentos (poliéster y nailon) no generan alteraciones significativas en variables ambientales como la temperatura, la humedad o la radiación solar (Hand y Keaster 1967, Nelson y Rieske 2014, Lázaro *et al.* 2015). Esto se debe a que su estructura porosa, junto con el uso de materiales ligeros y resistentes, permite una ventilación adecuada y una transmisión eficiente de luz, con lo que se evita la generación de estrés significativo en las plantas. Este diseño no solo resulta efectivo para excluir polinizadores, sino que también es económico, fácil de construir y aplicable a diversos ecosistemas y tipos de diseño experimental (Tetreault y Aho 2021).

Componentes del rendimiento y características de la semilla

En el diseño pareado, en cada planta, cubierta y descubierta, primeramente, se registraron diversas variables relacionadas con los frutos o vainas (Moreno 1984). Así, se cuantificó el número de frutos normales (FRUNOR) que, de acuerdo con Aguilar-Benítez *et al.* (2012), se identificaron como vainas bien desarrolladas, sin deformaciones y sin semillas abortadas; el número de frutos vanos (FRUVANO), los cuales según Sánchez y Vidal (2015), son aquellos en los que las semillas no maduraron adecuadamente y que presentaban deformaciones y por último, los frutos verdes (FRUVER), esto es, frutos que al momento de la cosecha aún no habían madurado. A partir de la suma de estas tres categorías, se obtuvo el número de frutos totales (FRUTOT). Posteriormente, de cada planta, se tomó una muestra al azar de 10 frutos normales, los cuales se abrieron para cuantificar el número de semillas normales (SEMNORV), es decir, aquellas que, de acuerdo con Escalante y Kohashi (1993), presentaron características de un desarrollo completo: testa lisa, color y tamaño típicos de la variedad, además de color brillante y llenado total de ambos cotiledones. Asimismo, se contabilizó el número de semillas no desarrolladas (SEMNODV), es decir, aquellas que presentaron llenado deficiente, deformidades o testa manchada y con arrugas (Madriz *et al.* 2008). Con estos datos se obtuvieron los promedios por fruto para cada categoría de desarrollo de la semilla. Adicionalmente, se registró el peso total de frutos normales (PFRUNOR), donde se incluyó el pericarpio (valvas) y las semillas; peso de frutos vanos (PFRUVANO), peso de semillas normales (PSEMNOR) y de semillas no desarrolladas (PSEMNOD). También se calculó el cociente del peso de semillas normales entre el peso de frutos normales, conocido como factor de desgrane (FDESG). Por último, en una muestra de 10 semillas normales por planta, tomadas al azar, se midió con ayuda de un vernier digital, la longitud (LONGSEM), ancho (ANCHOSEM) y espesor de semillas (ESPESEM) para luego obtener el promedio.

Análisis de datos

Con los datos obtenidos se construyó una base que contuvo 240 registros (60 por cada combinación sistema de manejo – variedad, compuesta a su vez por 30 observaciones correspondientes a plantas descubiertas y 30 a plantas cubiertas) y 14 variables. Para determinar si las variables cumplían con los supuestos del análisis de varianza, se aplicaron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas de Levene. Al no cumplirse los supuestos anteriores, para determinar diferencias entre las variables de rendimiento y las características de la semilla entre los tratamientos con y sin acceso a polinizadores dentro de cada combinación de sistema de manejo y variedad, se realizaron análisis no paramétricos, empleando la prueba de rangos de Mann-

Whitney, con un nivel de significancia del 5%, utilizando el software SAS® On Demand for Academics (SAS 2022).

Para determinar si existían patrones de agrupamiento entre las combinaciones de sistema de manejo-variedad-acceso a polinizadores, se realizó un análisis de conglomerados con el software InfoStat® (InfoStat 2020). Para este análisis, se emplearon nueve variables que, de acuerdo al análisis no paramétrico, mostraron diferencias estadísticas entre plantas con y sin acceso a polinizadores. Con los promedios por sistema de manejo-variedad-acceso, se calcularon las distancias euclidianas, para posteriormente elaborar un dendrograma utilizando el método de agrupamiento de mínima varianza dentro de grupos de Ward. Adicionalmente, para precisar cuáles variables explicaban en mayor medida la variación total observada, se realizó un análisis de componentes principales con el programa SAS® On Demand for Academics (SAS 2022).

RESULTADOS

El experimento estuvo en campo durante 179 días, en este tiempo, se tuvo una precipitación acumulada de 773.3 mm, lo que representó el 92.5% de la lluvia total ocurrida ese año en la localidad de estudio. Las temperaturas máximas semanales fluctuaron entre 21 y 31 °C, registrándose esta última al inicio del ciclo de cultivo; en cuanto a las mínimas, oscilaron entre 6 y 11 °C. En consecuencia, las temperaturas promedio oscilaron entre 13.5 y 21 °C. El periodo de floración transcurrió entre los 70 y los 102 dds; durante el mismo, aun cuando hubo una disminución de la precipitación alrededor de los 82 días, el total acumulado en ese lapso de tiempo fue de 170 mm; en cuanto a las temperaturas, las máximas se mantuvieron alrededor de los 25 °C y las mínimas, de los 7 °C. Antes y después de la floración, se tuvo una distribución más o menos uniforme de la lluvia y también condiciones de temperatura relativamente estables (Figura 1).

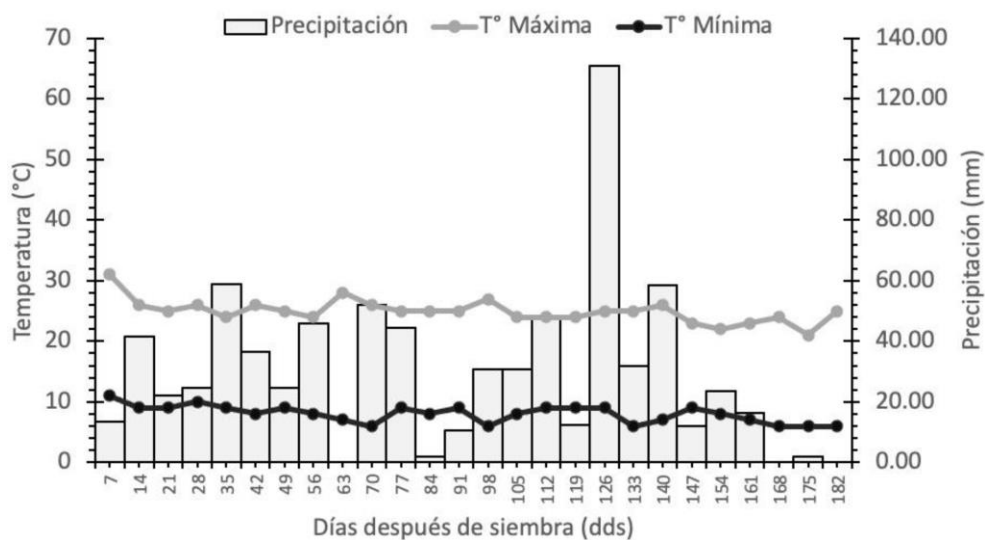


Figura 1. Registro semanal de temperaturas máximas y mínimas y precipitación registradas durante el desarrollo del experimento.

Los resultados mostraron que, con respecto a los componentes del rendimiento y las características de las semillas, en las cuatro combinaciones de manejo y color de flor (tradicional-flor blanca; tradicional-flor roja, tecnificado-flor blanca, tecnificado-flor roja), se presentaron diferencias al comparar plantas con y sin acceso a polinizadores en: número de frutos totales, normales y vanos, pesos de frutos vanos, normales, de semillas normales y no desarrolladas (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de resultados de la prueba de Mann-Whitney (valores de Z y su nivel de significancia, P) entre plantas con acceso y sin acceso a polinizadores en cada combinación de sistema de manejo-color de flor en *Phaseolus coccineus*.

Variables	Combinaciones manejo-variedad							
	Tradicional blanca		Tradicional Roja		Tecnificado Blanco		Tecnificado Roja	
	Con acceso vs Sin acceso		Con acceso vs Sin acceso		Con acceso vs Sin acceso		Con acceso vs Sin acceso	
	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P
FRUTOT	-6.835	<0.0001	-6.830	<0.0001	-6.816	<0.0001	-6.886	<0.0001
FRUNOR	-6.848	<0.0001	-6.845	<0.0001	-6.814	<0.0001	-6.888	<0.0001
FRUVANO	-4.196	<0.0001	-3.214	0.0021	-3.610	0.0006	-4.254	<0.0001
FRUVER	0.966	0.333	0.966	0.337	0.000	1.000	0.000	1.000
PFRUVANO	-4.364	<0.0001	2.679	0.009	-3.603	0.000	-4.549	<0.0001
PFRUNOR	-6.807	<0.0001	-6.731	<0.0001	-6.633	<0.0001	-6.868	<0.0001
PSEMNOR	-6.792	<0.0001	-6.761	<0.0001	-6.603	<0.0001	-6.876	<0.0001
PSEMNOD	-5.137	<0.0001	-6.283	<0.0001	-4.860	<0.0001	-6.130	<0.0001
FDESG	-1.634	0.111	-1.591	0.120	-1.306	0.199	-1.579	0.123
SEMNORV	-1.841	0.074	-1.575	0.124	1.025	0.311	-1.912	0.064
SEMNODV	-0.836	0.408	-2.850	0.007	-0.271	0.787	-0.861	0.395
LONGSEM	1.862	0.071	2.568	0.014	3.025	0.004	2.192	0.035
ANCHOSEM	1.815	0.078	3.119	0.003	1.665	0.104	2.569	0.014
ESPESEM	2.098	0.043	1.125	0.268	-0.698	0.489	1.768	0.086

FRUTOT = Número de frutos totales, FRUNOR = Número de frutos normales, FRUVANO = Número de frutos vanos, FRUVER = Número de frutos verdes, PFRUVANO = Peso de frutos vanos, PFRUNOR = Peso de frutos normales, PSEMNOR = Peso de semillas normales, PSEMNOD = Peso de semillas no desarrolladas, FDESG = Factor de desgrane, SEMNORV = Número de semillas normales, SEMNODV = Número de semillas no desarrolladas, LONGSEM = Longitud de semillas, ANCHOSEM = Ancho de semillas, ESPESEM = Espesor de semillas.

En todas las variables antes mencionadas, se presentaron valores más altos en las plantas con acceso de polinizadores que en aquellas sin acceso de éstos (Figuras 2 y 3). En relación al número de frutos verdes por planta, número de semillas normales por fruto y factor de desgrane, no hubo diferencias en la comparación entre plantas con y sin acceso a polinizadores en cada combinación de manejo-color de flor (Tabla 1). En el número de semillas no desarrolladas por fruto, sólo hubo diferencias en una de las cuatro combinaciones (tradicional-flor roja, $P = 0.0073$).

En lo que respecta al tamaño de las semillas, la comparación entre plantas con y sin acceso en cuanto a longitud de semilla mostró diferencias estadísticas en tres de las cuatro combinaciones (tradicional-flor roja, $P = 0.0146$; tecnificado-flor blanca, $P = 0.0045$ y tecnificado-flor roja, $P = 0.0353$).

También hubo diferencias en el ancho de semilla entre plantas con y sin acceso a polinizadores en dos combinaciones (tradicional-flor roja, $P = 0.0036$ y tecnificado-flor roja, $P = 0.0147$) (Tabla 1).

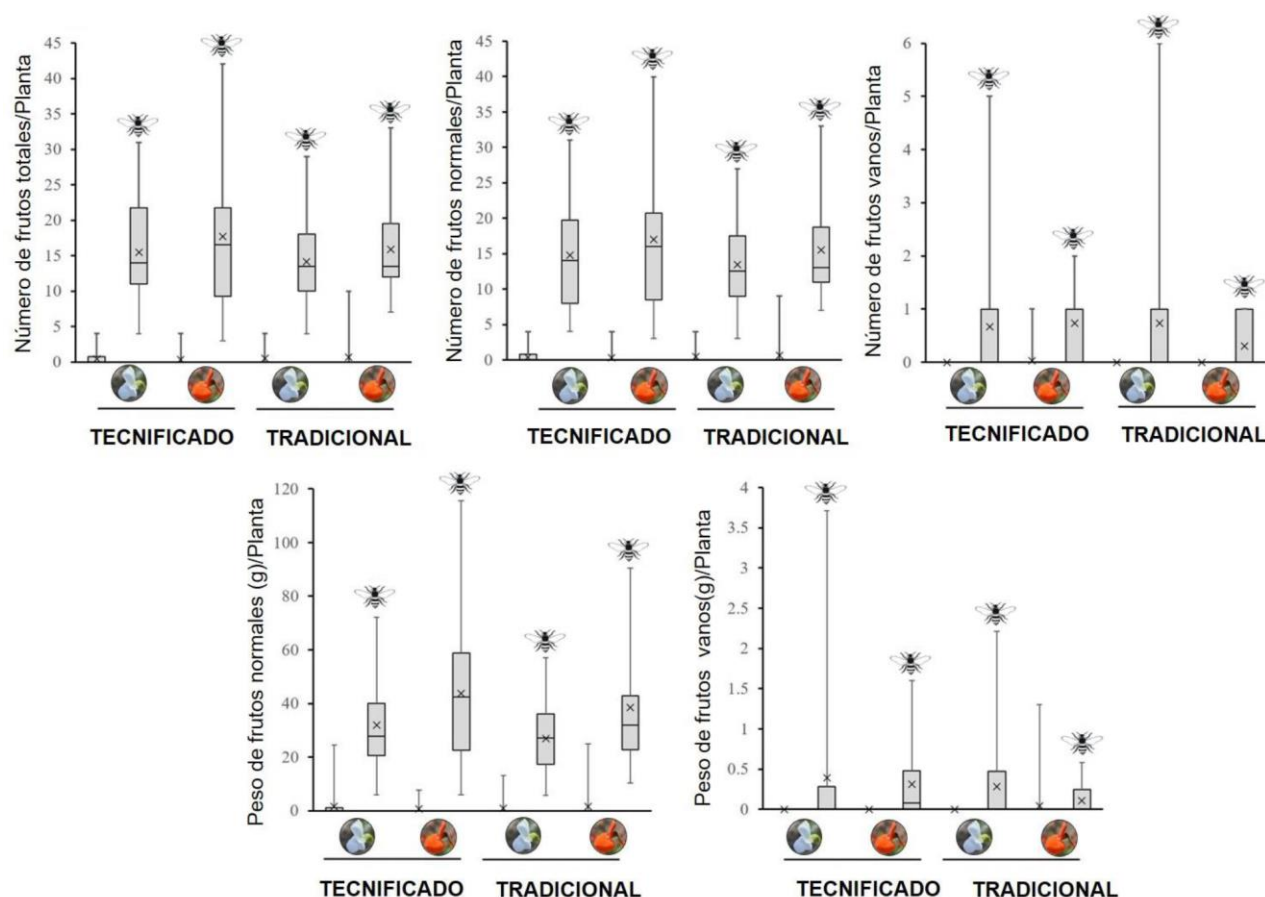


Figura 2. Diagramas de cajas y ejes que muestran la distribución del conjunto de datos de los componentes del rendimiento de *Phaseolus coccineus* en los que hubo diferencias al comparar plantas con acceso y sin acceso a polinizadores dentro de cada combinación de sistema de manejo y color de flor. La línea horizontal en las cajas, representa el valor de la mediana, el símbolo X representa el valor promedio, los márgenes del diagrama de caja indican el primer y tercer cuartil, los extremos de los ejes representan el valor máximo/mínimo. El símbolo del himenóptero en el extremo superior de los ejes representa la distribución de datos de plantas con acceso de polinizadores.

En cuanto al espesor de semilla, sólo se detectaron diferencias en la combinación tradicional-flor blanca ($P = 0.0434$). En este grupo de atributos de semilla, en todos los casos donde hubo diferencias, los valores de las medianas fueron mayores en aquellas plantas sin acceso a polinizadores que en las que sí interactuaron con éstos (Figura 3).

El dendrograma resultante del análisis de conglomerados reveló la formación de dos grupos, los cuales se distinguieron por el acceso o no acceso de polinizadores a las flores. El primer grupo estuvo conformado por aquellos sistemas de manejo agrícola y variedades que estuvieron expuestos a la interacción con polinizadores, mientras que el segundo grupo, estuvo compuesto por aquellos sistemas y variedades en los que se excluyó la interacción con tales organismos (Figura 4).

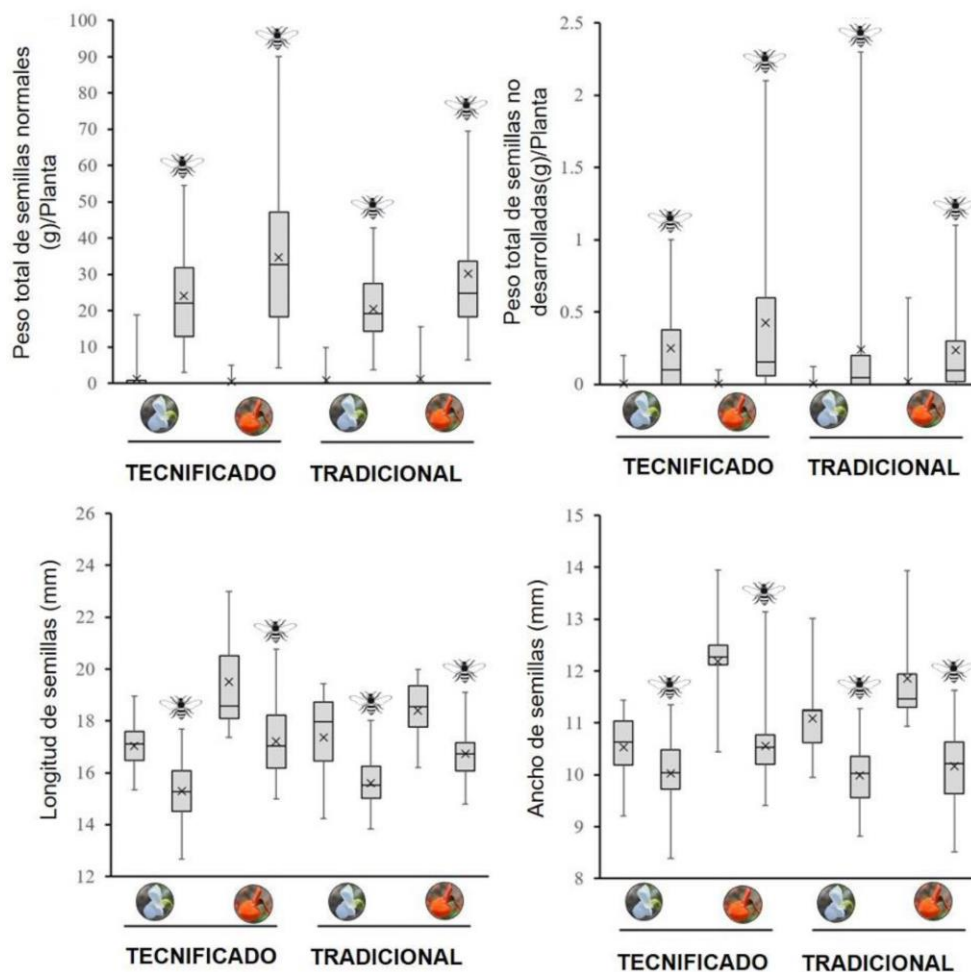


Figura 3. Diagramas de cajas y ejes que muestran la distribución del conjunto de datos de los atributos de semillas de *Phaseolus coccineus* en los que hubo diferencias al comparar plantas con acceso y sin acceso a polinizadores dentro de cada combinación de sistema de manejo y color de flor. La línea horizontal en las cajas, representa el valor de la mediana, el símbolo X representa el valor promedio, los márgenes del diagrama de caja indican el primer y tercer cuartil, los extremos de los ejes representan el valor máximo/mínimo. El símbolo del himenóptero en el extremo superior de los ejes representa la distribución de datos de plantas con acceso de polinizadores.

Las plantas del primer grupo (en el que se permitió el acceso de polinizadores) se caracterizaron por presentar una mayor cantidad de frutos totales (97.0%), de frutos normales (97.2% más) y mayor peso de los frutos (96.9% más) y semillas normales (96.7% más) respecto a plantas sin acceso a polinizadores (segundo grupo). Esta misma tendencia se observó para el número y peso de frutos vanos y el peso de semillas no desarrolladas por planta (Tabla 2). Por su parte, las plantas del segundo grupo (donde se excluyó a los polinizadores) se distinguieron por no presentar frutos vanos y porque sus semillas fueron más largas (10.3% más) y anchas (10.7% más) que las del primer grupo (Tabla 2).

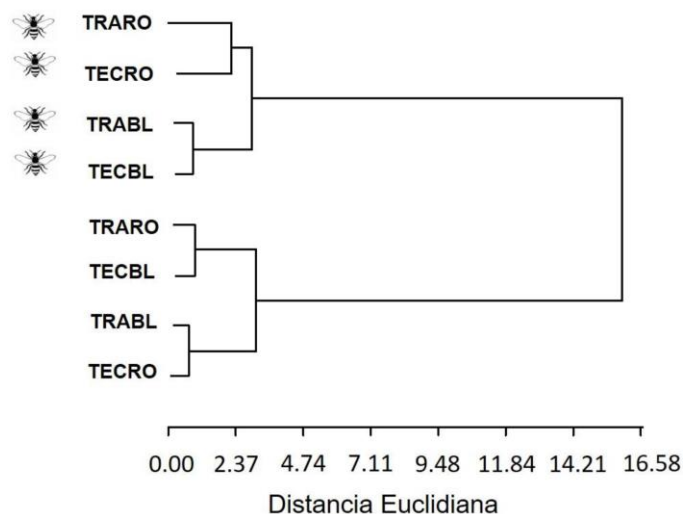


Figura 4. Dendrograma obtenido con el método de Ward para los ocho tratamientos con base en distancia euclidianas y en el que se muestra la formación de dos grupos. TRARO = Sistema tradicional con flores rojas y acceso a polinizadores, TECRO = Sistema tecnificado con flores rojas y acceso a polinizadores, TRABL = Sistema tradicional con flores blancas y acceso a polinizadores, TECBL = Sistema tecnificado con flores blancas y acceso a polinizadores, TRARO = Sistema tradicional con flores rojas sin acceso a polinizadores, TECBL= Sistema tecnificado con flores blancas sin acceso a polinizadores, TRABL = Sistema tradicional con flores blancas sin acceso a polinizadores, TECRO = Sistema tecnificado con flores rojas sin acceso a polinizadores.

Con el propósito de precisar cuáles variables fueron las más importantes para explicar la variación observada, se condujo un análisis de componentes principales. Este reveló que los tres primeros componentes principales explicaron, en conjunto, el 99.0% de la variación total. El primer componente (CP1) contribuyó individualmente con 85.4%, el segundo (CP2) con 9.6% y el tercero (CP3) con 4%. El primer componente presentó asociaciones principalmente con el número total de frutos (vector propio: 0.355), el número de frutos normales (0.355), el peso de frutos normales (0.347), el peso de semillas normales (0.345) y el peso de semillas no desarrolladas (0.344), lo cual indica que estas variables fueron las más relevantes para explicar la variación total existente. El segundo componente estuvo asociado con atributos de la semilla, particularmente con el largo (0.682) y el ancho (0.562). En el tercer componente, las variables que más influyeron fueron el número de frutos vanos (0.492) y el peso de éstos (0.653). La distribución espacial de los tratamientos con base en los tres componentes principales muestra que, en concordancia con lo encontrado en el dendrograma, las combinaciones estudiadas se separaron en dos grandes grupos a lo largo del CP1, donde aquellas plantas que tuvieron acceso a polinizadores presentaron valores más altos de número total de frutos y de frutos normales, un mayor peso de frutos normales, de semillas normales y de semillas no desarrolladas que las plantas sin acceso a polinizadores (Figura 5). El distanciamiento que mostró la combinación manejo tradicional – flor roja – acceso a polinizadores, se explica por el hecho de que, de todos los tratamientos donde se permitió la

interacción con polinizadores, fue el que tuvo los valores más bajos de frutos vanos y de peso de los mismos (Tabla 2), que fueron las dos variables originales asociadas al Componente Principal 3, que es para el cual dicho tratamiento tuvo un valor de -1.26, lo cual lo ubicó en la parte más baja del eje correspondiente.

Tabla 2. Componentes de rendimiento y dimensiones de la semilla de *Phaseolus coccineus* registrados en las diferentes combinaciones sistema de manejo – color de flor – acceso de polinizadores, organizadas con base en los grupos identificados en el dendrograma (Promedio $\pm$ desviación estándar).

Variables	Combinaciones manejo-variedad							
	Grupo I				Grupo II			
	TRARO	TECRO	TRABL	TECBL	TRARO	TECRO	TRABL	TECBL
	Acceso de polinizadores				Sin acceso de polinizadores			
FRUTOT (Núm.)	15.83 $\pm$ 6.64	17.73 $\pm$ 9.82	14.17 $\pm$ 6.23	15.43 $\pm$ 7.30	0.63 $\pm$ 1.92	0.33 $\pm$ 0.88	0.50 $\pm$ 1.04	0.40 $\pm$ 0.85
FRUNOR (Núm.)	15.53 $\pm$ 6.71	17.00 $\pm$ 9.57	13.43 $\pm$ 6.19	14.76 $\pm$ 7.32	0.6 $\pm$ 1.75	0.30 $\pm$ 0.84	0.43 $\pm$ 1.00	0.4 $\pm$ 0.85
FRUVANO (Núm.)	0.30 $\pm$ 0.46	0.73 $\pm$ 0.78	0.73 $\pm$ 1.20	0.67 $\pm$ 1.18	0.00 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.18	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
FRUVER (Núm.)	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.18	0.00 $\pm$ 0.00	0.07 $\pm$ 0.36	0.00 $\pm$ 0.00
PFRUVANO (g)	0.11 $\pm$ 0.18	0.32 $\pm$ 0.42	0.28 $\pm$ 0.46	0.39 $\pm$ 0.84	0.04 $\pm$ 0.23	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
PFRUNOR (g)	38.46 $\pm$ 21.92	43.76 $\pm$ 26.94	27.03 $\pm$ 11.99	31.93 $\pm$ 17.97	1.68 $\pm$ 4.94	0.82 $\pm$ 2.03	1.03 $\pm$ 2.69	1.64 $\pm$ 4.61
PSEMNOR (g)	30.19 $\pm$ 17.68	34.67 $\pm$ 21.22	20.43 $\pm$ 9.15	24.10 $\pm$ 14.54	1.18 $\pm$ 3.27	0.57 $\pm$ 1.36	0.76 $\pm$ 2.03	1.19 $\pm$ 3.51
PSEMNOD (g)	0.24 $\pm$ 0.33	0.42 $\pm$ 0.59	0.24 $\pm$ 0.47	0.25 $\pm$ 0.31	0.020 $\pm$ 0.109	0.003 $\pm$ 0.018	0.004 $\pm$ 0.022	0.007 $\pm$ 0.036
FDESG (adimensional)	0.44 $\pm$ 0.02	0.44 $\pm$ 0.01	0.43 $\pm$ 0.03	0.42 $\pm$ 0.06	0.41 $\pm$ 0.04	0.41 $\pm$ 0.04	0.42 $\pm$ 0.02	0.41 $\pm$ 0.03
SEMNORV (Núm.)	2.67 $\pm$ 0.59	2.64 $\pm$ 0.69	2.26 $\pm$ 0.55	2.29 $\pm$ 0.45	2.07 $\pm$ 1.21	1.90 $\pm$ 0.74	1.52 $\pm$ 0.95	2.75 $\pm$ 1.13
SEMNODV (Núm.)	0.28 $\pm$ 0.20	0.30 $\pm$ 0.31	0.37 $\pm$ 0.29	0.40 $\pm$ 0.34	0.03 $\pm$ 0.08	0.26 $\pm$ 0.43	0.22 $\pm$ 0.22	0.42 $\pm$ 0.47
LONGSEM (mm)	16.73 $\pm$ 0.98	17.20 $\pm$ 1.38	15.60 $\pm$ 1.00	15.29 $\pm$ 1.13	18.4 $\pm$ 1.36	19.51 $\pm$ 2.28	17.37 $\pm$ 2.07	17.03 $\pm$ 1.14
ANCHOSEM (mm)	10.17 $\pm$ 0.85	10.56 $\pm$ 0.69	9.99 $\pm$ 0.58	10.03 $\pm$ 0.73	11.86 $\pm$ 1.08	12.18 $\pm$ 1.27	11.09 $\pm$ 1.26	10.53 $\pm$ 0.72
ESPESEM (mm)	7.51 $\pm$ 0.71	7.63 $\pm$ 0.56	7.35 $\pm$ 0.50	7.43 $\pm$ 0.61	7.82 $\pm$ 1.01	8.34 $\pm$ 1.22	7.87 $\pm$ 0.37	7.38 $\pm$ 0.58

TRARO = Sistema tradicional con flores rojas, TECRO = Sistema tecnificado con flores rojas, TRABL = Sistema tradicional con flores blancas, TECBL = Sistema tecnificado con flores blancas. FRUTOT = Número de frutos totales, FRUNOR = Número de frutos normales, FRUVANO = Número de frutos vanos, FRUVER = Número de frutos verdes, PFRUVANO = Peso de frutos vanos, PFRUNOR = Peso de frutos normales, PSEMNOR = Peso de semillas normales, PSEMNOD = Peso de semillas no desarrolladas, FDESG = Factor de desgrane, SEMNORV = Número de semillas normales, SEMNODV = Número de semillas no desarrolladas, LONGSEM = Longitud de semillas, ANCHOSEM = Ancho de semillas, ESPESEM = Espesor de semillas.

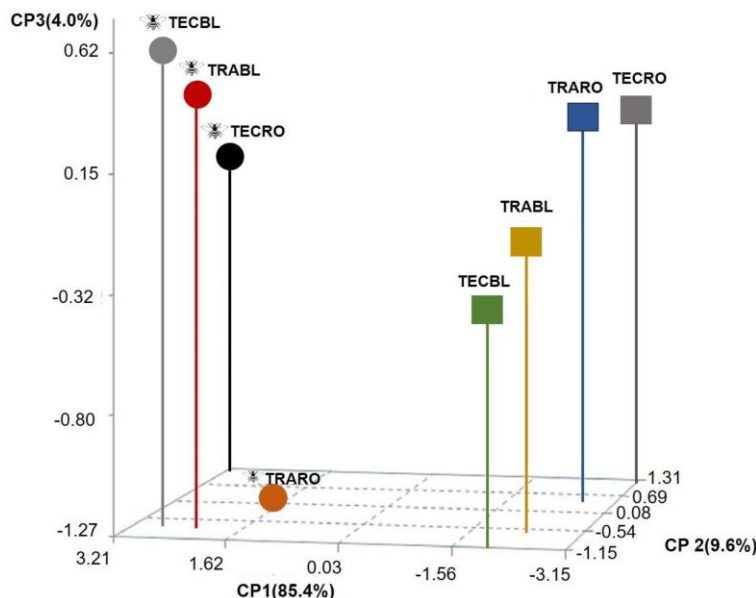


Figura 5. Dispersión de los ocho tratamientos definidos por los tres primeros componentes principales (CP). TRARO = Sistema tradicional con flores rojas y acceso a polinizadores, TECRO = Sistema tecnificado con flores rojas y acceso a polinizadores, TRABL = Sistema tradicional con flores blancas y acceso a polinizadores, TECBL = Sistema tecnificado con flores blancas y acceso a polinizadores. TRARO = Sistema tradicional con flores rojas sin acceso a polinizadores, TECBL = Sistema tecnificado con flores blancas sin acceso a polinizadores, TRABL = Sistema tradicional con flores blancas sin acceso a polinizadores, TECRO = Sistema tecnificado con flores rojas sin acceso a polinizadores.

DISCUSIÓN

De acuerdo con Rodiño *et al.* (2007), el frijol ayocote requiere temperaturas moderadas ($> 8^{\circ}\text{C}$) para germinar y crecer; los mismos autores agregan que las temperaturas óptimas oscilan entre 20 y 30°C . Dado que las temperaturas promedio registradas en la localidad de estudio estuvieron entre 13.5 y 21°C , se considera que estas fueron favorables para el cultivo. En cuanto a los requerimientos hídricos, se pueden tomar como referencia los del frijol común (*P. vulgaris*), los cuales oscilan entre 350 y 500 mm durante la estación de crecimiento (Salcedo 2008). En el año de evaluación se tuvieron 773.3 mm, por lo que se cubrieron las necesidades del cultivo.

En las plantas cultivadas que dependen de la polinización biótica, la presencia de los polinizadores es fundamental. Sin embargo y como lo señalan Henríquez-Piskulich *et al.* (2021), la agricultura industrial utiliza masivamente insumos externos, como pesticidas y fertilizantes para maximizar la producción, genera efectos negativos en los componentes bióticos y abióticos de los hábitats agrícolas, los cuales incluyen los recursos esenciales para los insectos polinizadores, tales como sitios de anidación, refugios y microhábitats. En contraste, las estrategias agroecológicas incorporan la biodiversidad en los agroecosistemas para imitar procesos ecológicos naturales, con

lo cual se incrementa la diversidad interna del agroecosistema, se reduce la dependencia de insumos externos destructivos, se mantiene la fertilidad del suelo, la productividad y la protección contra plagas, se beneficia a los insectos y se atraen polinizadores nativos que proporcionan un servicio exitoso de polinización. Por lo antes expuesto, se esperaba que la exclusión de polinizadores hubiera tenido efectos negativos particularmente en las combinaciones que incluyeron el sistema de manejo tecnificado. Sin embargo, ello no ocurrió, pues la afectación en la expresión de las diferentes variables medidas (componentes del rendimiento y características de semillas) se presentó por igual tanto en las combinaciones que involucraron un manejo tecnificado como el tradicional. Esto implica que, en el contexto de esta investigación, cualquier efecto que pudiera haber tenido el sistema de manejo se vio ampliamente superado por el acceso o no acceso de polinizadores a las flores.

Por otra parte, se ha reportado que el color de las flores juega un papel importante en la interacción con los polinizadores (Phillips *et al.* 2020). En concordancia con ello, Chittka *et al.* (1994) mencionan que la coloración de las flores influye en la constancia, la tasa de visitas y eventualmente en el éxito reproductivo de las plantas, debido a que el color actúa como una señal para la búsqueda de alimento por parte de los polinizadores, los cuales poseen sistemas visuales diferentes que les permiten ser más sensibles a determinadas longitudes de onda (Menzel y Backhaus 1991). En *P. coccineus*, como parte de la diversidad morfológica intraespecífica, existen variedades de flores blancas y rojas (Vargas-Vázquez *et al.* 2011, López-Báez *et al.* 2018) y se ha documentado que las flores rojas son más atractivas para insectos polinizadores respecto a las flores blancas, azules o rosas que exhiben otras especies del género *Phaseolus* (Duke 1981). Con base en esta información, se consideró que el color de la flor podría ser otro factor que influiría en las variables estudiadas en las plantas con acceso a las visitas de polinizadores. Sin embargo, los hallazgos muestran que el color de la flor no fue una variable que afecte de forma negativa la interacción de los polinizadores, ya que las tendencias fueron las mismas entre combinaciones donde sólo varió el color de flor. Por lo que el factor determinante en las respuestas observadas fue el acceso o exclusión de los polinizadores.

Los resultados indican que en todas las combinaciones sistema de manejo – variedad estudiada en *Phaseolus coccineus*, el número total de frutos y de frutos normales, el peso de frutos y semillas normales, número y peso de frutos vanos y peso de semillas no desarrolladas, fueron afectados de forma negativa al excluir los polinizadores de las flores. Ello puede explicarse por los altos porcentajes de alogamia que se han reportado para la especie. Al respecto, Blackwall (1971) apunta que tal porcentaje oscila entre el 20 y 50%; Búrquez y Sarukhán (1984) consignan valores entre el 63 y 87% para poblaciones cultivadas y del 47 al 91% en poblaciones silvestres de México, en tanto que Escalante *et al.* (1994) mencionan valores de entre 59 y 70% para materiales cultivados. Resulta interesante que las dos variedades empleadas en este estudio respondieran de forma similar ante la interacción o exclusión de polinizadores, pues ello evidencia que en ambas existe una alta dependencia de la polinización cruzada, mediada en este caso por vectores bióticos. Es conveniente señalar que los resultados observados en plantas cuyas flores no estuvieron en contacto con polinizadores se atribuyen a la ausencia de interacción con estos y no a efectos microambientales derivados del uso de las mallas (Olsen *et al.*, 2022), pues de acuerdo con Hand y Keaster (1967), Nelson y Rieske (2014), Lázaro *et al.* (2015), estas no afectan de forma importante.

En las especies cultivadas cuya estructura de interés es la semilla, la productividad de esta estructura, a nivel morfológico, es el resultado de los denominados componentes del rendimiento, específicamente los relacionados con el número de unidades reproductivas (espigas, mazorcas, vainas, entre otras), número de semillas por unidad reproductiva, así como el peso promedio de la semilla (Gardner *et al.* 1989). Aun cuando no se cuenta con información específica para *P. coccineus*, se puede poner en contexto lo encontrado para *P. vulgaris*, especie para la cual Fageria y Santos (2008) listan como componentes del rendimiento al número de fruto (vainas) por unidad de área o por planta, el número de semillas por fruto y el peso de 100 semillas.

La importancia de la polinización biótica y sus consecuencias en el cuajado de frutos de *P. coccineus* se documenta en Kendal y Smith (1976) en Inglaterra e Ibarra-Perez *et al.* (1999) en Estados Unidos, en este último caso, para *P. vulgaris*. En ambas investigaciones se registró una menor producción de frutos y semillas en ausencia de polinizadores eficientes. En otro trabajo de exclusión de polinizadores desarrollado en Polonia, se encontró que hubo una disminución en el cuajado de entre el 100.0 y el 99.1% de los frutos en comparación con plantas con acceso (Wróblewska 1991); mientras que Fohouo *et al.* (2014) encontraron que en *P. coccineus* cultivado en Camerún, el 53.5% de la producción de frutos era atribuible a la influencia de polinizadores. Con estos antecedentes se muestra cómo la exclusión o limitación de polinizadores tiene consecuencias directas negativas sobre el número de frutos por planta. Esta misma tendencia fue la que se obtuvo en el presente estudio, en el cual, en las plantas donde se excluyeron a los polinizadores, la cantidad de frutos totales y normales fue significativamente menor, además de que se presentó menor peso de frutos y semillas normales por planta en comparación con aquéllas donde hubo acceso de polinizadores. En plantas donde se permitió el acceso de polinizadores también hubo mayor cantidad de frutos vanos y, por tanto, mayor peso de estos y de semillas no desarrolladas. Ello es un comportamiento reportado en las leguminosas, como el caso de *Glycine max* (soya), donde entre un 60 y 75% del total de flores producido por la planta aborta y no contribuye al rendimiento. Se estima que aproximadamente la mitad de esa aborción ocurre antes de que las flores desarrollen en frutos jóvenes y la otra mitad, se debe a la aborción de frutos (Ritchie *et al.* 1992). De acuerdo con Quagliotti y Marletto (1987), en *P. coccineus*, aun cuando la floración es copiosa, un porcentaje alto de flores no cuaja en frutos.

Un aspecto interesante, coincidente con lo reportado por Quagliotti y Marletto (1987), fue el hecho de que el número de semillas normales y de semillas no desarrolladas por fruto se mantuvo constante, independientemente del acceso o no de polinizadores. Una posible explicación es que el número de semillas por fruto es una característica con alta heredabilidad (78.2% en *P. vulgaris*), esto es, que su expresión fenotípica está determinada mayormente por el componente genético (Fageria y Santos 2008, Checa *et al.* 2011). Esto significa que son características estables en cuanto a su nivel de expresión y que, por tanto, una vez que ocurre la fertilización, independientemente de si esta fue por la acción de los polinizadores o es el resultado de una autofecundación, el número de semillas que se desarrollará será el mismo. En relación con esto último, Ramírez-Vallejo y Acosta-Gallegos (1995) encontraron que en *Phaseolus vulgaris* hay tres etapas críticas durante la fase reproductiva: la iniciación floral y el desarrollo de las flores o inflorescencias, cuando se determina el número potencial de semillas; la antesis y fertilización, cuando se fija el grado de ese potencial, y el desarrollo de la semilla.

Otro resultado, no reportado en trabajos previos, debido a que no se había cuantificado, fue el relacionado con el tamaño de las semillas normales que se formaron en cada caso. Si bien la cantidad de éstas por fruto fue igual en plantas con o sin acceso a polinizadores, las de las plantas cubiertas tendieron a ser más grandes (largas y anchas) que las de las plantas con libre acceso a polinizadores. El espesor de las semillas se mantuvo sin cambios. Una posible explicación podría ser un mecanismo conocido como compensación de componentes de rendimiento, el cual se expresa ante condiciones de estrés y que consiste en que ante una reducción en uno o más componentes de rendimiento, la planta compensa tal disminución con un aumento en otros componentes (Ritchie *et al.* 1992).

Los resultados destacan la importancia de la polinización biótica en los componentes de rendimiento y características de la semilla de las dos variedades de *P. coccineus* incluidas en este estudio y subrayan la necesidad de adoptar prácticas agrícolas que permitan conservar y aprovechar de manera sostenible este valioso servicio ecosistémico. Entre estas prácticas se incluyen el establecimiento de zonas libres de pesticidas, el uso de insecticidas selectivos y el manejo integrado de plagas. Asimismo, es fundamental sensibilizar a los agricultores mediante programas de educación ambiental, establecer normativas que limiten el uso de agroquímicos y promuevan prácticas agrícolas sostenibles, así como ampliar las áreas protegidas. También se recomienda crear hábitats climáticamente inteligentes, como setos vivos, cultivos de cobertura y plantaciones de flores silvestres, además de fomentar el cultivo en suelos sanos que actúen como sumideros de carbono. Estas estrategias contribuirán a conservar la biodiversidad, mantener la salud de los polinizadores y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas (Nikhil-Reddy 2025, Xerces Society 2019).

CONCLUSIONES

La exclusión de polinizadores causó una disminución significativa en variables asociadas al rendimiento, particularmente en el número de frutos totales y normales y, consecuentemente, en el peso de semillas normales, pero no modificó el número de semillas normales y no desarrolladas por fruto, ni el factor de desgrane. Las semillas normales producidas en plantas que no interactuaron con polinizadores fueron escasas, sin embargo, resultaron más largas y anchas respecto de aquellas provenientes de plantas que permanecieron con libre acceso a la interacción de polinizadores. Estos resultados fueron consistentes en ambos sistemas de manejo agronómico y colores de flor. Los resultados obtenidos, resaltan la importancia que tiene la polinización biótica en el rendimiento del frijol ayocote y la necesidad de conservar este servicio ecosistémico mediante prácticas agrícolas sostenibles, como el manejo integrado de plagas, la creación de hábitats diversificados, la regulación del uso de agroquímicos y prácticas agroecológicas.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Eladio Espinoza Técuatl, productor de frijol ayocote, por facilitarnos las parcelas donde se realizó nuestra investigación y las instalaciones del Rancho “María Isabel” para el desarrollo de

trabajo de campo. A la M. C. Sarahi Nocelo Rojas e Ingenieros José Hernández Cortés y Hugo García Perea, por su colaboración en la siembra y conducción de las parcelas. La primera autora agradece al CONACYT por la beca de posgrado Núm. 441216 y al Colegio de Postgraduados por el Apoyo a Actividades Académicas y de Estudiantes para el desarrollo de la investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no tienen ningún conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Benítez G, Peña-Valdivia CB, García-Nava RJ, Ramírez-Vallejo P, Benedicto-Valdés SG, Molina-Galán JD (2012) Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia* 46: 37-52.
- Blackwall FLC (1971) A study of the plant/insect relationships and pod-setting in the runner bean (*Phaseolus multiflorus*). *Journal of Horticultural Science* 46(4): 365-379. <https://doi.org/10.1080/00221589.1971.11514416>
- Búrquez A, Sarukhán J (1984) Biología floral de poblaciones silvestres y cultivadas de *Phaseolus coccineus* L. II. Sistemas reproductivos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 46: 3-12. <https://doi.org/10.17129/botsci.1311>
- Búrquez A, Sarukhán KJ (1980) Biología de poblaciones silvestres y cultivadas de *Phaseolus coccineus* L. I. Relaciones planta-polinizador. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 39: 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.1173>
- Carabalí-Banguero D, Montoya-Lerma J, Carabalí-Muñoz A (2018) Efecto de la exclusión de insectos visitantes florales en el cuajado de frutos de *Persea americana* (Lauraceae) cv. Hass. *Acta Zoológica Mexicana* 34: e3412121. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412121>
- Checa COE, Yama EVM, Fúel TSM (2011) Evaluación por componentes de rendimiento de nueve genotipos y un testigo de frijol arbustivo *Phaseolus vulgaris* L. *Revista de Ciencias Agrícolas* 28(1): 73-90.
- Chittka L, Shmida A, Troje N, Menzel R (1994) Ultraviolet as a component of flower reflections, and the colour perception of Hymenoptera. *Vision Research* 34(11): 1489-1508. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90151-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90151-1)
- Cunha NL, Chacoff N, Saez A, Schmucki R, Galetto L, Devoto M, Carrasco J, Mazzei M, Castillo S, Palacios T, Vesprini J, Agostini K, Saraiva A, Woodcock B, Ollerton J, Aizen M, Mazzei M (2023) Soybean dependence on biotic pollination decreases with latitude. *Agriculture Ecosystems & Environment*: 108376. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108376>
- Duke JA (1981) Handbook of legumes of world economic importance. Plenum Press, New York, United States, and London, United Kingdom. 345p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8151-8>
- Eilers EJ, Kremen C, Greenleaf SS, Garbe AK, Klein AM (2011) Contribution of pollinator mediated crops to nutrients in the human food supply. *Plos One* 6(6): e21363. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021363>
- Escalante AM, Coello G, Eguiarte LE, Piñero D (1994) Genetic structure and mating systems in wild and cultivated populations of *Phaseolus coccineus* and *P. vulgaris* (Fabaceae). *American Journal of Botany* 81(9): 1096-1103. <https://doi.org/10.2307/2445471>

- Escalante EJA, Kohashi SJ (1993) El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 84p.
- Fageria NK, Santos AB (2008) Yield physiology of dry bean. *Journal of Plant Nutrition* 31(6): 983-1004. <https://doi.org/10.1080/01904160802096815>
- Fohouo FNT, Tope SF, Brückner D (2014) Foraging and pollination behaviour of *Xylocopa olivacea* (Hymenoptera: Apidae) on *Phaseolus coccineus* (Fabaceae) flowers at Ngaoundéré (Cameroon). *International Journal of Tropical Insect Science* 34(2): 127-137. <https://doi.org/10.1017/S1742758414000241>
- Gardner FP, Pearce RB, Mitchell RL (1989) Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 325p.
- Hand LF, Keaster AJ (1967) The environment of an insect field cage. *Journal of Economic Entomology* 60(4): 910-915. <https://doi.org/10.1093/jee/60.4.910>
- Henríquez-Piskulich PA, Schapheer C, Vereecken NJ, Villagra C (2021) Agroecological strategies to safeguard insect pollinators in biodiversity hotspots: Chile as a case study. *Sustainability* 13: 6728. <https://doi.org/10.3390/su13126728>
- Hünicken PL, Morales CL, Aizen MA, Anderson GKS, García N, Garibaldi LA (2021) Insect pollination enhances yield stability in two pollinator-dependent crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 320: 107573. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107573>
- Ibarra-Perez FJ, Barnhart D, Ehdaie B, Knio KM, Waines JG (1999) Effects of insect tripping on seed yield of common bean. *Crop Science* 39(2): 428-433. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183x0039000200022x>
- INEGI (2010) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Calpan, Puebla. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. 9p. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21026.pdf. Fecha de consulta: 11 de agosto de 2024.
- InfoStat (2020) Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>. Fecha de consulta: 11 de agosto de 2020.
- Kendall DA, Smith BD (1976) The pollinating efficiency of honeybee and bumblebee visits to flowers of the runner bean *Phaseolus coccineus* L. *Journal of Applied Ecology* 13(3): 749-752. <https://doi.org/10.2307/2402252>
- Koltowski Z (2004) Flowering biology, nectar secretion and insect foraging of the runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Journal of Apicultural Science* 48(2): 53-60.
- Lázaro A, Lundgren R, Totland Ø (2015) Pollen limitation, species' floral traits and pollinator visitation: Different relationships in contrasting communities. *Oikos* 124(2): 174-186. <https://doi.org/10.1111/oik.01525>
- López-Báez LI, Taboada-Gaytán OR, Gil-Muñoz A, López PA, Ortiz-Torres E, Vargas-Vázquez MLP, Díaz-Cervantes R (2018) Diversidad morfoagronómica del frijol ayocote en el altiplano centro-oriente de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(4-A): 487-497. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4-A.487-497>
- Madriz P, Jáuregui D, Warnock R (2008) Aborción de óvulos y semillas de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y caracterización de anomalías morfoanatómicas, en dos cultivares en dos localidades de Venezuela. *Interciencia* 33(12): 910-915.
- Menzel R, Backhaus W (1991) Colour vision in insects. In: Gouras P (ed) Vision and visual dysfunction. Vol. VI. The perception of colour. Macmillan Press. London, UK. pp. 262-293.
- Moreno NP (1984) Glosario botánico ilustrado. Compañía Editorial Continental S. A. de C. V. Cd. México, México. 300p.
- Nelson LA, Rieske LK (2014) Microclimatic variation within sleeve cages used in ecological studies. *Journal of Insect Science* 14(167): 2014. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieu029>

- Nikhil-Reddy KS (2025) Pollinator health: balancing agricultural practices with conservation efforts. *Indian Entomologist* 6(1): 55-58.
- Olsen SL, Evju M, Åström J, Løkken JO, Dahle S, Andresen JL, Eide NE (2022) Climate influence on plant–pollinator interactions in the keystone species *Vaccinium myrtillus*. *Ecology and Evolution* 12(5): e8910. <https://doi.org/10.1002/ece3.8910>.
- Pan K, Marshall L, Biesmeijer K, De Snoo GR (2022) The distributions of insect, wind and self pollination of plants in the Netherlands in relation to habitat types and 3D vegetation structure. *Journal of Pollination Ecology* 31: 16–28. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2022\)684](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2022)684).
- Pando JB, Fohouo FNT, Tamesse JL (2011) Foraging and pollination behaviour of *Xylocopa calens* Lepeletier (Hymenoptera: Apidae) on *Phaseolus coccineus* L. (Fabaceae) flowers at Yaounde (Cameroon). *Entomological Research* 41(5): 185-193. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5967.2011.00334.x>
- Perrot T, Gaba S, Roncoroni M, Gautier JL, Saintilan A, Bretagnolle V (2019) Experimental quantification of insect pollination on sunflower yield, reconciling plant and field scale estimates. *Basic and Applied Ecology* 34: 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.09.005>
- Phillips RD, Peakall R, Van der Niet T, Johnson SD (2020) Niche perspectives on plant–pollinator interactions. *Trends in Plant Science* 25: 779-793. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.009>
- Pleasant JM, Hellmich RL, Dively GP, Sears MK, Stanley-Horn DE, Mattila HR, Foster JE, Clark P, Jones GD (2001) Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 11919-11924. <https://doi.org/10.1073/pnas.21128749>.
- Quagliotti L, Marletto F (1987) Research on the pollination of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.) for dry grain production. *Advances in Horticultural Science* 1(1): 43-49.
- Ramírez-Vallejo P, Acosta-Gallegos JA (1995) Factores abióticos que afectan la productividad del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) con énfasis en la sequía. In: Pérez MJ, Ferrera CR, García ER (eds) *Diversidad genética y patología del frijol*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México. pp. 52-68.
- Ritchie SW, Hanway JJ, Thompson HE, Benson GO (1992) How a soybean plant develops. Special Report No. 53. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa, USA. 20p.
- Rodiño AP, Lema M, Pérez-Barbeito M, Santalla M, De Ron AM (2007) Assessment of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.) germplasm for tolerance to low temperature during early seedling growth. *Euphytica* 155: 63-70. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9301-6>
- Ruíz-Salazar R, Mayek-Pérez N, Vargas-Vázquez MLP, Hernández-Delgado S, Muruaga-Martínez JS (2019) Análisis de la estructura poblacional del frijol ayocote (*Phaseolus coccineus* L.) mediante AFLP. *Polibotánica* 47: 13-24. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.47.2>
- SADER, SEMARNAT, SENASICA, CONABIO, CONANP (2021) Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Sustentable de Polinizadores en México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/629651/ENCUSP_calidad_media_corregido.pdf. Fecha de consulta: 11 de agosto de 2024.
- Salcedo JM (2008) Regeneration guidelines: Common bean. In: Dulloo ME, Thormann I, Jorge MA, Hanson J (eds) *Crop specific regeneration guidelines*. CGIAR System-wide Genetic Resource Programme, Rome, Italy. <https://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/index.php/crops-mainmenu-367/other-crops-regeneration-guidelines-mainmenu-290/bean-mainmenu-397>. Fecha de consulta: 30 de mayo de 2025.
- Sánchez DS, Vidal BJ (2015) Vermicomposta y sustentabilidad: Respuesta del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de temporal a la aplicación de enmienda orgánica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1: 441-444.
- SAS (2022) SAS® On Demand for Academics. (2022) https://www.sas.com/es_mx/software/on-demand-for-academics.html. Fecha de consulta: 15 de abril de 2022.

- Schwember AR, Carrasco B, Gepts P (2017) Unraveling agronomic and genetic aspects of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Field Crops Research* 206: 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.020>
- Shivanna K, Tandon R, Koul M (2020) 'Global Pollinator Crisis' and its impact on crop productivity and sustenance of plant diversity. In: Tandon R, Shivanna K, Koul M (eds) *Reproductive ecology of flowering plants: patterns and processes*. Springer. Singapore. pp. 395-413. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4210-7_16
- SMN (2025) Información Estadística Climatológica. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>. Fecha de consulta: 25 de mayo de 2025.
- Smith MR, Mueller ND, Springmann M, Sulser TB, Garibaldi LA, Gerber J, Wiebe K, Myers SS (2022) Pollinator deficits, food consumption, and consequences for human health: a modeling study. *Environmental Health Perspectives* 130(12): 127003. <https://doi.org/10.1289/EHP10947>
- Sood VK, Sanadya SK, Kumar S, Chand S, Kapoor R (2022) Health benefits of oat (*Avena sativa*) and nutritional improvement through plant breeding interventions. *Crop and Pasture Science* 74(11): 993-1013. <https://doi.org/10.1071/CP22268>
- Sosenski P, Domínguez CA (2018) El valor de la polinización y los riesgos que enfrenta como servicio ecosistémico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 89(3): 961-970. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.2168>
- Tanda AS (2022) Why insect pollinators are important in crop improvement? *Indian Journal of Entomology* 84(1): 223-236. <https://doi.org/10.55446/IJE.2021.42>
- Tetreaul T y Aho K. (2021) An updated insect enclosure design for pollination ecology. *Journal of Pollination Ecology* 29(19): 249-257. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2021\)651](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2021)651)
- Todd J, Pan Y-B, Boykin D (2020) Fidelity of sugarcane crosses assessed with SSR markers. *Agronomy* 10(3): 386. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030386>
- Vargas-Vázquez P, Muruaga-Martínez JS, Martínez-Villarreal SE, Ruiz-Salazar R, Hernández-Delgado S, Mayek-Pérez N (2011) Diversidad morfológica del frijol ayocote del Carso Huasteco de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82(3): 767-775. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.698>
- Wagner DL (2020) Insect declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology* 65: 457-480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025151>
- Wietzke A, Westphal C, Gras P, Kraft M, Pfohl K, Karlovsky P, Pawelzik E, Tscharnkte T, Smit I (2018) Insect pollination as a key factor for strawberry physiology and marketable fruit quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 258: 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.036>
- Wróblewska A (1991) Attractiveness of *Phaseolus* L. flowers for pollinating insects. *Acta Horticulturae* 288: 321-325. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1991.288.51>
- Xerces Society (2019) Building climate resilience into pollinator habitat restoration in the Central Valley. https://xerces.org/sites/default/files/publications/19-044_Climate%20Change%20FS_web%20-%20Krystal%20Eldridge.pdf. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2025.