

Incremento de temperatura: desafío emergente para la producción de frijol y el control de sus virus y plagas en México

Temperature increase: an emerging challenge for common bean production and the control of its viruses and pests in Mexico

José Luis Anaya-López^{1*}, Elizabeth Chiquito-Almanza¹, Jorge Alberto Acosta-Gallegos¹, Oscar Hugo Tosquy-Valle²

RESUMEN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivo clave para la seguridad alimentaria en México, requiere de condiciones térmicas específicas para su desarrollo reproductivo. En el ciclo otoño-invierno 2024, en ensayos experimentales realizados en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se registraron pérdidas totales y parciales en siembras de frijol de diversas variedades, coincidentes con las temperaturas récord registradas en mayo. Además, se documentó la presencia de "raíz negra" en el cultivo, lo que sugiere la necesidad de estudios específicos para establecer si se están presentando cambios en la dinámica de plagas y enfermedades, relacionados con el estrés térmico. El objetivo de este trabajo fue analizar evidencia científica sobre el impacto del incremento térmico en la fisiología reproductiva de frijol y su relación con la dinámica de enfermedades virales y plagas, como marco teórico para interpretar estos fenómenos emergentes y desarrollar estrategias de mitigación. Las temperaturas elevadas afectan la fisiología reproductiva del frijol y alteran las interacciones planta-patógeno, creando nuevos desafíos fitosanitarios. Ante proyecciones climáticas de condiciones más extremas, se requiere determinar la asociación entre el incremento térmico y las observaciones de campo, desarrollar variedades tolerantes al calor portadoras del gen *bc-3* para resistencia a virus, monitorear virus y plagas emergentes, adaptar tecnologías de manejo integrado basadas en un diagnóstico preciso, e identificar áreas alternativas de producción. Las pérdidas registradas en 2024 en los ensayos experimentales constituyen una alerta sobre el impacto de las altas temperaturas en la seguridad alimentaria de México.

PALABRAS CLAVE: *Phaseolus vulgaris*, estrés térmico, virus emergentes, *Empoasca* spp, seguridad alimentaria.

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a key crop for food security in Mexico, which requires specific thermal conditions for its reproductive development. During the fall-winter 2024 cycle, experimental trials conducted at the Bajío Experimental Station of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) recorded total and partial losses in common bean plantings of diverse varieties, coinciding with record high temperatures recorded in May. Additionally, the presence of "top necrosis" has been documented in the crop, suggesting the need for specific studies to establish whether changes in pest and disease dynamics related to thermal stress are occurring. The objective of this work was to analyze scientific evidence on the impact of thermal increase on common bean reproductive physiology and its relationship with viral diseases and pest dynamics, as a theoretical framework to interpret these emerging phenomena and develop mitigation strategies. Elevated temperatures affect common bean reproductive physiology and alter plant-pathogen interactions, creating new phytosanitary challenges. Given climate projections of more extreme conditions, it is necessary to determine the association between thermal increase and field observations, develop heat-tolerant varieties carrying the *bc-3* gene for virus resistance, monitor emerging viruses and pests, adapt integrated management technologies based on precise diagnosis, and identify alternative production areas. The losses recorded in 2024 in the experimental trials constitute an alert about the impact of high temperatures on food security in Mexico.

KEYWORDS: *Phaseolus vulgaris*, heat stress, emerging viruses, *Empoasca* spp, food security.

*Correspondencia: anaya.jose@inifap.gob.mx/Fecha de recepción: 10 de marzo de 2025/Fecha de aceptación: 4 de septiembre de 2025/ Fecha de publicación: 11 de septiembre de 2025.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, km 6.5, carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, municipio de Medellín, Veracruz, México, C. P. 94270.

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es de gran importancia cultural y económica en México, donde es un cultivo relevante por superficie sembrada y cuyo grano constituye la principal fuente de proteína vegetal para la población (Jacinto-Hernández y col., 2019). De acuerdo con los datos de los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2023), los frijoles negros, que agrupa a numerosas variedades de dos tipos principales, Negro brillante y Negro opaco, son los de mayor producción y consumo, seguidas por las de tipo Pinto.

La producción de frijol se ve afectada por temperaturas elevadas durante la floración, ya que impactan negativamente en el rendimiento y la calidad del grano (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020). Estudios de modelación predijeron que la región productora de frijol en México era un área crítica, donde los efectos del cambio climático serían intensos y se manifestarían a corto plazo (Medina-García y col., 2016; Beebe y col., 2017). Estas predicciones se confirmaron en mayo de 2024 que, de acuerdo con el Reporte del Clima en México del Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA, 2024), fue el mes más caluroso en la historia de México. Los cambios extremos de temperatura influyen en las epidemias virales al afectar la fisiología de la planta y su interacción ecológica, incrementando la frecuencia y patogenicidad de los virus que las infectan (Trebicki, 2020). Las condiciones climáticas que se presentaron recientemente, particularmente el estrés térmico, podrían repetirse de manera recurrente en los próximos años y alterar la dinámica de plagas y enfermedades del frijol, lo que requiere de estudios dirigidos a documentar el fenómeno.

El objetivo de este trabajo fue analizar la evidencia sobre los efectos de las temperaturas altas en la fisiología reproductiva del frijol y su influencia en la dinámica de plagas y enfermedades virales, así como sus implicaciones para el mejoramiento genético, el manejo integrado y la seguridad alimentaria de México.

Producción de frijol en México: contexto y vulnerabilidad climática

La producción de frijol en México varía según el estado y los tipos preferidos por los consumidores. Zacatecas es el principal productor, seguido por Sinaloa, juntos aportan aproximadamente 50 % de la producción nacional. Nayarit, Chihuahua, Chiapas, Durango, Guanajuato y Veracruz completan el grupo más importante, con un aporte conjunto de 36.2 %. En Zacatecas predomina el cultivo de los frijoles Negro brillante (49.0 %) y Pinto (33.4 %), además de los tipos Flor de mayo y Flor de junio (ambos de color rosita). En Sinaloa se cultiva casi exclusivamente frijol Azufrado (97.3 %), mientras que en Nayarit se produce frijol Pinto (34.2 %), Negro (21.8 %) y Azufrado (21.6 %). Chiapas produce mayormente frijol Negro opaco de grano pequeño (74.6 %), y Veracruz solo cultiva este tipo de frijol. En Chihuahua y Durango predomina el frijol Pinto con 99.0 % y 62.8 %, respectivamente, en tanto que Guanajuato se especializa en los tipos Flor de junio (32.4 %) y Flor de mayo (30.7 %) (FIRA, 2023).

Casi 70 % de la producción nacional se obtiene en el ciclo primavera-verano (PV), mayormente en la región centro-norte (Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato y Querétaro), donde se genera aproximadamente 50 % de la producción total nacional en condiciones de temporal de secano. El 30 % restante se cultiva en el ciclo otoño-invierno (OI). En este último ciclo, Sinaloa aporta 50 % de la producción, principalmente en condiciones de riego, mientras que Nayarit contribuye con el 22 %, dos tercios de los cuales se cultivan en temporal bajo humedad residual (FIRA, 2023).

El frijol requiere entre 300 mm y 400 mm de agua durante su ciclo fenológico, característica que ha favorecido su producción en condiciones de temporal en la zona centro-norte del país donde se obtienen rendimientos entre 500 kg/ha y 800 kg/ha. El riego impacta positivamente su productividad con rendimientos entre 1 600 kg/ha y 1 800 kg/ha (FIRA, 2023).

La producción de frijol en México depende en gran medida de las lluvias, lo que la vuelve vulnerable a condiciones de precipitación errática y deficiente. En los últimos 5 años, la escasez de lluvias y su irregular distribución fue un factor determinante para que la producción nacional disminuyera 5 %, tendencia que se agravó en 2022, cuando la producción del ciclo PV se redujo 32.5 % respecto al año anterior (FIRA, 2023). Esta problemática se ha abordado desde una perspectiva de mejoramiento genético durante décadas, y aunque se dispone de variedades tolerantes a estrés hídrico, la mayoría son de tipo Pinto (Anaya-López y col., 2021). No obstante, la vulnerabilidad del frijol a las altas temperaturas recién está cobrando relevancia. En distintas partes del mundo, incluido México, se realizan investigaciones para identificar fuentes de tolerancia (Suárez y col., 2020; Anaya-López y col., 2022; Appiah-Kubi y col., 2022).

El mejoramiento genético de frijol en México enfrenta desafíos particulares. La diversidad de tipos de frijol demandados por los consumidores y la variedad de condiciones agroclimáticas en las que se producen (Rodríguez-Licea y col., 2010; Espinosa-García y col., 2021) representan un reto importante. Las fuentes de tolerancia a factores bióticos, y particularmente abióticos, en esta especie, son limitadas; y su cruzamiento produce segregantes con una amplia variación de formas, tamaños y colores sin demanda comercial (Beebe y col., 2009).

El trabajo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) es fundamental en el desarrollo de variedades mejoradas para las distintas regiones productoras del país (Anaya-López y col., 2021). De las 100 variedades registradas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales, 80 fueron desarrolladas por el INIFAP. Entre estas destacan 'Negro Jamapa', 'Mayocoba', 'Azufrado Higuera', 'Flor de Junio Marcela' y 'Pinto Saltillo', consideradas referentes nacionales por su demanda por los consumidores (Rodríguez-Licea y col., 2010; Espinosa-García y col., 2021).

Para incrementar la precisión de selección y acelerar el desarrollo de nuevas variedades, en el INIFAP se han incorporado marcadores moleculares ligados a genes de interés específico. Destacan los que confieren resistencia a roya y antracnosis (ambas, enfermedades de origen fúngico), a diferentes virus, así como al oscurecimiento lento de la testa, un carácter de calidad importante en frijol (Anaya-López y col., 2021). En relación con la resistencia a virus, desde 2012, el Campo Experimental Bajío (Guanajuato), en colaboración con las sedes de Coahuila (Veracruz) y Santiago Ixcuintla (Nayarit), adoptaron como política que las nuevas variedades de frijol desarrolladas por el Programa de Mejoramiento de frijol, incorporaran marcadores ligados al gen *I* (Anaya-López y col., 2021). Las 5 variedades liberadas por dichos centros en el periodo 2018-2025 portan este gen (Jiménez-Hernández y col., 2018; Anaya-López y col., 2021; Anaya-López y col., 2025b; Tosquy-Valle y col., 2025). Sin embargo, la incorporación del gen *I* depende de la disponibilidad de fuentes parentales que permitan una introgressión eficiente en términos de tiempo de desarrollo, y de priorizar la resistencia viral sobre otros caracteres en función de la incidencia de virus en la región a las que está destinada la variedad, así como de la disponibilidad de recursos económicos por restricciones presupuestarias futuras (Acosta-Gallegos y col., 2021).

El gen *I*, naturalmente presente en diversos genotipos, confiere resistencia al virus del mosaico común del frijol (BCMV, por sus siglas en inglés: bean common mosaic virus) y reduce la diseminación del virus de la necrosis y del mosaico común del frijol (BCMNV, bean common mosaic necrosis virus). El Programa de Mejoramiento de frijol, mediante estrategias de mejoramiento genético, también incorpora en sus variedades desarrolladas el gen *bc-3*, de resistencia a BCMV y BCMNV (Drijfhout y col., 1978), y el gen *bgm-1*, que reduce el mosaico y el amarillamiento sistémico producidos por el virus del mosaico amarillo dorado del frijol (BGYMV, por sus siglas en inglés: bean golden yellow mosaic virus) (Morales y Niessen, 1988).

La primera variedad de frijol en México desarrollada mediante selección asistida por marcadores moleculares, a la que se le incorporó el gen *I*, fue 'Dalia' de tipo Flor de Junio (Acosta-Gallegos y col., 2014). Otras variedades más recientes, que también contienen este gen, son: 'Salinas' de tipo Pinto (Jiménez-Hernández y col., 2018), 'San Blas' (Acosta-Gallegos y col., 2020), 'Rubí' (Ibarra-Pérez y col., 2022) y 'Rincón Grande' (Tosquy-Valle y col., 2025) de tipo Negro opaco, y 'San Luis 22' de tipo Negro brillante (Anaya-López y col., 2025b). De estas, 'San Blas' porta además el gen *bc-3*, y 'Rubí' el gen *bgm-1*, lo que les confiere resistencia a los virus prevalentes en sus regiones objetivo. Las principales características y genes de resistencia de las variedades de frijol desarrolladas hasta el 2021 por el INIFAP fueron reportadas en el artículo de Anaya-López y col. (2021).

La incorporación del gen *I* en las variedades de frijol, como estrategia para reducir las pérdidas ocasionadas por BCMV y BCMNV y limitar su diseminación, tiene implicaciones importantes en el contexto del calentamiento global que serán discutidas más adelante.

Temperaturas extremas: una amenaza emergente

Estudios de modelación realizados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2015) indican que el estrés térmico será la restricción abiótica con mayor probabilidad de limitar la productividad de frijol a escala global, incluido México. Estimaciones actuales de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés: World Meteorological Organization (2024) prevén que entre 2024 y 2028, la temperatura media global será 1.1 °C a 1.9 °C superior al periodo de referencia de 1850-1900, con 86 % de probabilidad de que se alcance un nuevo máximo histórico por encima del registro de 2023, que es el año más cálido documentado. Las plantas, al ser organismos sésiles (inmóviles), son particularmente vulnerables al estrés térmico cuando se exponen a temperaturas superiores a su óptimo por periodos prolongados. Este estrés afecta

los procesos fisiológicos, el crecimiento y el desarrollo, causando alteraciones en la floración, desincronización reproductiva y pérdida de estructuras reproductivas (Vargas y col., 2021).

El frijol tiene una temperatura base mínima de 8.3 °C, con un máximo óptimo de 25 °C (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009). Esta leguminosa se desarrolla de manera óptima entre 10 °C y 21 °C. Temperaturas superiores a 30 °C/20 °C (día/noche) durante la floración causan la esterilidad del polen y el aborto de botones, flores, embriones y vainas, por lo que afectan el rendimiento y la calidad del grano hasta en un 60 % (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020). La disminución de la producción, calidad y rendimiento se manifiesta a través del incremento en el porcentaje de semillas arrugadas, y reducción en el tamaño y número de semillas, número de vainas, peso promedio de las semillas y del número de semillas por vaina (Rainey y Griffiths, 2005). La exposición de flores de frijol recién abiertas a 35 °C durante 2 d reduce alrededor de 50 % la viabilidad del polen (Weaver y col., 1985), mientras que la exposición por 5 d a 32 °C y 27 °C (día/noche) previo a la antesis impide la producción de vainas con semillas maduras (Gross y Kigel, 1994).

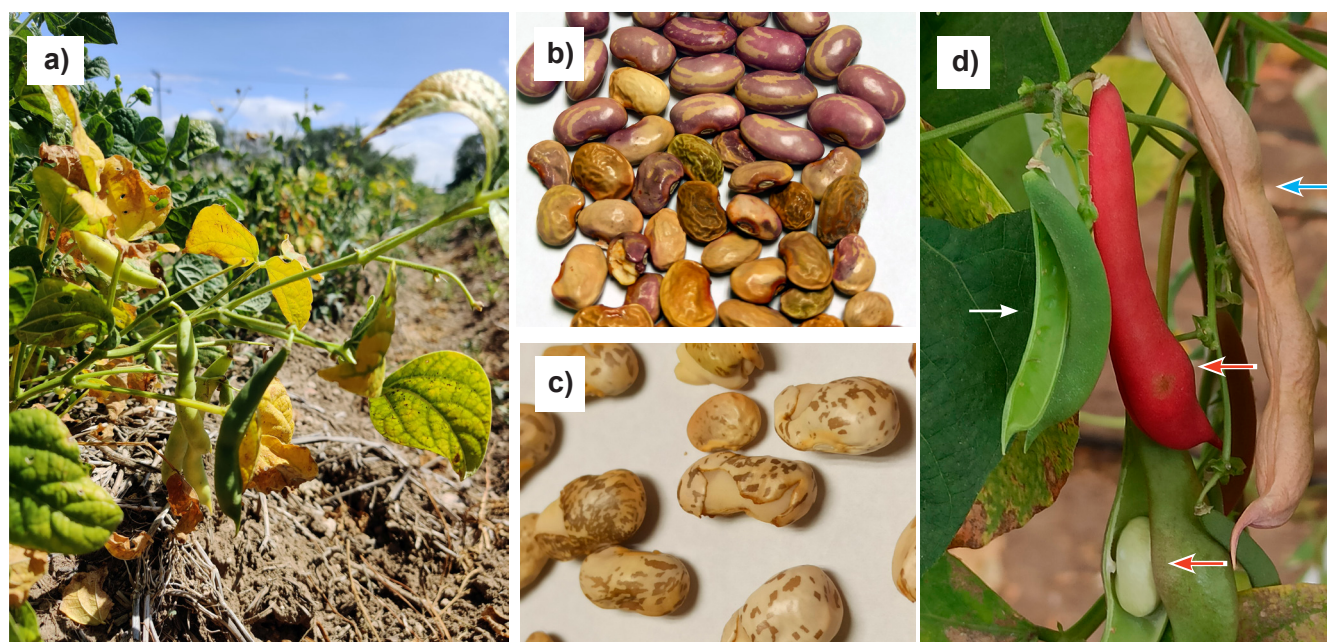
El clima de El Bajío permite sembrar frijol bajo condiciones de riego en el ciclo OI. En Guanajuato, las fechas recomendadas para su siembra en este ciclo son del 1 de febrero al 10 de marzo (Acosta-Gallegos y col., 2013). En 2024, la mayor parte del territorio nacional enfrentó temperaturas sin precedentes, con récord histórico de un promedio de 27 °C en mayo (SMN-CONAGUA, 2024).

El efecto de estas temperaturas récord en la fisiología reproductiva y el rendimiento de frijol se confirmó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del INIFAP en Celaya, Guanajuato, donde Prado-García y col. (2025) evaluaron 100 genotipos, incluidas variedades mejoradas, nativas y líneas experimentales de distintos tipos de frijol. El estudio se desarrolló en 2024, durante los dos ciclos de cultivo: OI,

y PV, lo que permitió evaluar la respuesta de los genotipos bajo tres condiciones de crecimiento contrastante. En el ciclo OI (febrero-mayo), correspondiente a la época seca, las condiciones de riego completo posibilitaron analizar el estrés por altas temperaturas, en tanto que la presencia de altas temperaturas y sequía terminal durante esa época permitió evaluar el estrés combinado. Por otra parte, la época de lluvias, en el ciclo PV (julio-octubre) proporcionó condiciones óptimas (control). La etapa reproductiva del cultivo, durante la época seca, ocurrió entre abril y mayo, y de acuerdo con la Red de Estaciones Agroclimáticas del estado de Guanajuato de la Fundación Guanajuato Produce (FGP, 2025), mayo fue el mes más cálido del año. En el CEBAJ, las temperaturas promedio diurnas y nocturnas durante ese mes, fueron de 30.7 °C y 22 °C, con máximas de 37.4 °C y 33.1 °C, res-

pectivamente. Estas condiciones extremas de calor indujeron pérdidas de rendimiento, que se manifestaron en el aborto de embriones y la reducción del número de vainas y de granos por vaina, además del deterioro de la calidad de la semilla (Figuras 1a-1d). Aunque algunos materiales genéticos lograron producir bajo esas condiciones, los estragos fueron significativos: de 100 genotipos, 42 no produjeron semilla. De estos últimos, 9 no desarrollaron flores. En el resto se observó aborto de flores y vainas pequeñas que contenían 1 o 2 semillas de baja calidad y tamaño.

El rendimiento promedio de los 58 genotipos que produjeron semilla, en ambos tratamientos, fue de 889 kg/ha en riego (estrés por altas temperaturas) y 317 kg/ha en sequía terminal (estrés combinado) (Prado-García y col., 2025). Estos rendimientos fueron significativa-



a) Reducción del número de vainas y granos por vaina en una variedad de hábito determinado bajo condiciones de riego; b) Arrugamiento del grano de una variedad de tipo Flor de junio; c) Arrugamiento del grano de una variedad de tipo pinto; d) Aborto de embriones (flecha blanca) y reducción del número de granos por vaina (flechas rojas) en comparación con desarrollo óptimo (vainas de color pajizo; flecha celeste) en frijol criollo de hábito indeterminado.

■ **Figura 1. Efecto de las temperaturas altas en la producción de frijol durante el ciclo otoño-invierno 2024 en el Campo Experimental Bajío.**

Figure 1. Effect of high temperatures on common bean production during the fall-winter 2024 cycle at Bajío Experimental Station.

mente inferiores al rendimiento promedio nacional de 1 700 kg/ha para condiciones de riego y 650 kg/ha para temporal (FIRA, 2023).

En contraste, en el ciclo de temporal PV de 2024, la etapa reproductiva ocurrió entre septiembre y octubre. En septiembre, el mes más cálido, las temperaturas promedio diurnas y nocturnas fueron 23.3 °C y 17.8 °C, con máximas de 30.0 °C y 23.9 °C, respectivamente (FGP, 2025), lo que sugiere que este ciclo es el más adecuado para evadir las pérdidas causadas por temperaturas altas. Sin embargo, es importante considerar que, las predicciones realizadas por Medina-García y col. (2016), basadas en modelos climáticos, indican un incremento de 1.1 °C a 2.6 °C en la temperatura promedio entre mayo y octubre en las principales regiones productoras de frijol de temporal en México hacia los años 2030, 2050 y 2070. Los autores consideran que dicho incremento, junto con la disminución de la precipitación, reducirá la superficie con potencial alto para este cultivo.

Los resultados obtenidos por Prado-García y col. (2025), indican que el incremento de la temperatura en el año 2024 indujo la inhibición total en la producción de granos de diferentes variedades, así como fuertes reducciones en el rendimiento de las variedades que mostraron distintos niveles de resistencia al calor y la sequía. Estos resultados coin-

cidieron con observaciones de campo realizadas por técnicos de la FGP y de la Secretaría del Campo de Guanajuato (SECAM) en el ciclo OI 2024 en parcelas de riego. Los técnicos detectaron pérdidas totales en lotes de frijol a los que daban seguimiento, en los municipios de Salvatierra, Irámucó, Jaral del Progreso y Valle de Santiago, Guanajuato (Héctor Valencia Morales, líder de proyectos de FGP, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 2 de septiembre, 2025; Luis Manuel Rojas Tovar, Agente Técnico de SECAM, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 3 de septiembre, 2025). La coincidencia existente entre la evidencia científica (Prado-García y col., 2025), los datos climáticos que reportaron altas temperaturas durante abril y mayo y las observaciones de campo, mostraron discrepancia con los reportes oficiales (Tabla 1), lo que señala la necesidad de fortalecer los sistemas de documentación de siniestros agrícolas.

Las estaciones climáticas ubicadas en los municipios de Acámbaro, Celaya, Jaral del Progreso, Salvatierra y Valle de Santiago, reportaron que los datos presentados corresponden a las temperaturas máximas diurnas y nocturnas. Las diurnas, estuvieron entre 35.2 °C y 37.4 °C, y las nocturnas entre 30.7 °C y 33.7 °C. Acámbaro fue, en promedio, 2.3 °C más fresco (FGP, 2025). Dichas condiciones térmicas exceden los umbrales críticos para

■ **Tabla 1. Registro de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada de frijol en Guanajuato durante el ciclo otoño-invierno 2024 (SIAP, 2025a; 2025b).**

Table 1. Record of planted, harvested, and damaged bean area in Guanajuato during the fall-winter 2024 cycle (SIAP, 2025, 2025a; 2025b).

Fecha	Superficie* (ha)			Producción* (T)	Rendimiento*
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada		
Febrero	682	0.00	0.00	0.00	0.00
Marzo	1 061	0.00	0.00	0.00	0.00
Abril	1 061	0.00	0.00	0.00	0.00
Mayo	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45
Junio	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45
Julio	1 061	1 061	0.00	2 594.51	2.45

*El reporte se realiza como cifra acumulada.

la formación de vainas y llenado de grano (Rainey y Griffiths, 2005; Suárez y col., 2020), y coincidieron temporalmente con la etapa reproductiva de las siembras de frijol establecidas en esas localidades. El hecho de que fueran siembras de riego indica que la causa de pérdidas se asoció a las altas temperaturas de la región en el periodo.

Los reportes mensuales de avance de siembras y cosechas de frijol en Guanajuato, para el ciclo OI 2024, proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2025a; 2025b) muestran que se establecieron 682 ha de frijol en febrero con un acumulado de 1 061 ha en marzo, lo que indica que se sembraron 379 ha en este último mes (Tabla 1). En cuanto a la producción alcanzada, el reporte oficial de cierre al 31 de julio documenta una producción de 2 594.51 T, sin que haya registro de hectáreas siniestradas.

Considerando que las fechas de siembra recomendadas para frijol en la región son del 1 de febrero al 10 de marzo, y que este cultivo tiene un ciclo productivo de 110 d (Acosta-Gallegos y col., 2013), las siembras tempranas del 1 de febrero (682 ha) debían cosecharse el 21 de mayo. Al cierre de ese mes se registró una producción de 2 594.51 T (Tabla 1). Mientras que las siembras tardías, del 1 al 10 de marzo (379 ha), que representaron el 35.7 % de la superficie sembrada, debieron completarse el 19 de junio. Sin embargo, el reporte oficial de cierre al 30 de junio documenta una producción acumulada de 2 594.51 T, lo que implica la ausencia de producción en el periodo de siembras tardías. La omisión del reporte de producción en el mes de junio y de superficie siniestrada sugieren que las superficies no cosechadas pueden ser omitidas de su clasificación como siniestro cuando las causas específicas no son identificadas sistemáticamente en campo. Esto podría considerarse como una limitación metodológica importante del sistema oficial de registro de pérdidas agrícolas, especialmente para las condiciones climáticas que se están presentando globalmente y que afectan la producción de frijol.

El fenómeno emergente de calor de 2024 alertó sobre la vulnerabilidad del frijol a las temperaturas extremas y motiva a que, además de registrar en las bases de datos oficiales las pérdidas de los cultivos, se documenten a profundidad las causas que las originan para establecer una línea base que permita tomar medidas preventivas o correctivas evitando que el problema se generalice. Es importante motivar la participación de expertos para plantear hipótesis, diseñar estudios específicos y generar información precisa.

Mejoramiento genético

Para reducir el impacto del cambio climático en el cultivo del frijol en México, es necesario implementar estrategias como prácticas agro-nómicas, desarrollar variedades tolerantes a temperaturas altas y a baja disponibilidad hídrica, producir en zonas y temporadas con regímenes térmicos e hídricos más favorables o introducir cultivos alternativos tolerantes, que tengan aceptación comercial por parte del consumidor al que va dirigido. De estos últimos destacan el caupí (*Vigna unguiculata* L.), del que se han identificado variedades que mantienen la viabilidad del polen hasta 41 °C (Weaver y col., 1985) y el frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) que es tolerante al estrés hídrico y térmico; y compatible con *P. vulgaris* (Barrera y col., 2024).

En relación con el mejoramiento genético, destacan dos opciones principales: identificar germoplasma de frijol (*P. vulgaris*) tolerante, o realizar cruza interespecíficas con especies tolerantes como *P. acutifolius*. Tene y col. (2023) evaluaron 196 genotipos del género *Phaseolus*, e identificaron 5 de *P. vulgaris*, 2 de *P. lunatus*, 1 de *P. coccineus* y 1 de *P. acutifolius* resistentes, tanto a condiciones de estrés moderado en campo (máximas de 29.9 °C) como a estrés extremo en invernadero (máximas de 43.9 °C). Por su parte, Rose y col. (2023) identificaron una línea de tipo Andino (HTA4), derivada de la cruza entre *P. vulgaris* y *P. acutifolius*, tolerante a 31 °C/24 °C (día/noche), cuyo mecanismo de tolerancia se asoció a la germinación exitosa del estigma,

y al mantenimiento de la viabilidad del polen. Si bien, estos resultados son prometedores, en ninguno de los dos estudios se indicaron los rendimientos ni la calidad del grano, por lo que deben tomarse con precaución. Además, la tolerancia a factores abióticos, como el estrés térmico y la sequía, involucra mecanismos genéticos complejos controlados por múltiples genes, lo que puede complicar el mejoramiento (Lone y col., 2021). Esto contrasta con la resistencia al estrés biótico, que típicamente presenta una herencia monogénica y, en algunos casos, hay marcadores moleculares ligados o asociados al gen de interés que facilitan su selección (Assefa y col., 2019).

Los avances en tolerancia a temperaturas altas en México son incipientes, siendo los genotipos tolerantes identificados en el ciclo OI 2024 en el CEBAJ (Prado-García y col., 2025) el progreso más significativo. Hasta ahora, el Programa de Mejoramiento de Frijol del INIFAP ha priorizado la tolerancia a sequía como factor determinante del rendimiento (Anaya-López y col., 2021). Sin embargo, en el contexto del cambio climático se debe considerar también la tolerancia al calor. Esta característica es crucial en ambientes donde ambos estreses ocurren simultáneamente, como documentaron Appiah-Kubi y col. (2022), quienes evaluaron 40 variedades de frijol tolerantes a sequía en el ciclo PV, y confirmaron que solo aquellas que toleraban temperaturas altas completaron su desarrollo reproductivo, independientemente del manejo de fósforo y riego. Ello indica que, si el incremento de temperatura en las regiones productoras de frijol en México sobrepasa los umbrales de tolerancia durante el ciclo PV, las consecuencias serán críticas independientemente de la disponibilidad de agua.

Efectos del cambio climático en la dinámica de plagas y enfermedades virales

Las alteraciones climáticas afectan la prevalencia, distribución e intensidad de plagas y enfermedades vegetales mediante múltiples mecanismos, donde la temperatura y la precipitación pluvial son factores críticos (Sharma y

col., 2020; Alfizar y Nasution, 2024). El cambio climático puede incrementar la vulnerabilidad de las plantas a plagas y patógenos actualmente limitados por condiciones climáticas desfavorables, y propiciar la emergencia de patógenos preexistentes como agentes causales de enfermedades (Reddy, 2018; Sharma y col., 2020). Investigaciones de campo sobre la incidencia estacional de insectos plaga en girasol mostraron correlación positiva significativa entre la temperatura y las poblaciones de mosquita blanca (*Bemisia tabaci* Genn.) y chicharrita (*Empoasca* spp) (Basit y col., 2016). De manera similar, en frijol mungo (*Vigna radiata* L.), las poblaciones de *B. tabaci* y áfidos también tuvieron una correlación positiva con la temperatura, y negativa con la humedad y las precipitaciones (Gehlot y Prajapat, 2021).

La manera en que el incremento de temperatura afectará la dinámica de los insectos plaga puede variar en función del clima de cada región. Se prevé que especies confinadas a regiones tropicales y subtropicales se extenderán a zonas templadas, mientras que algunas especies vulnerables a temperaturas altas podrían disminuir en las regiones templadas (Deutsch y col., 2018). Esto se debe a que las regiones templadas no tienen la temperatura óptima para su desarrollo, por lo que los insectos crecerán más rápido con el aumento de temperatura; mientras que en los trópicos, al estar cerca de su óptimo, las poblaciones crecerán más lentamente cuando la temperatura se eleve demasiado.

No obstante, anticipar los efectos del calentamiento global en los insectos es complejo. El estudio realizado por Lehmann y col. (2020) concluye que, la amenaza que representan como plagas puede no aumentar de manera uniforme debido a las necesidades específicas de nicho, tolerancias fisiológicas y efectos variables de la temperatura en su fenología y ciclo de vida, por lo que la mitigación de sus efectos requiere comprender mejor las respuestas de especies individuales y los mecanismos ecológicos subyacentes. Esta eviden-

cia también sugiere la necesidad de un monitoreo constante.

Entre los principales insectos plaga del frijol destacan la mosquita blanca (*B. tabaci*) y las chicharritas del género *Empoasca*. De esta última, en un mismo campo pueden coexistir varias especies, como se documentó en Cuba con *E. kraemeri* Ross y Moore, *E. fabae* Harris y *E. papayae* Oman (Sánchez-Castro y col., 2016). Aunque no se ha demostrado que el género *Empoasca* transmita virus al frijol, *E. kraemeri* causa toxemia severa al inyectar toxinas salivales (Backus y col., 2005). Por otra parte, *E. papayae* tiene la capacidad de transmitir fitoplasmas y el virus de la meilitra (PeMV) a la papaya, lo que destaca la importancia de su correcta identificación taxonómica, para estudiar su epidemiología y desarrollar estrategias de control.

Aunque no hay publicaciones que muestren un incremento en la incidencia de la chicharrita (*Empoasca* spp) en el cultivo de frijol en México, diferentes investigadores que laboran en los campos de investigación del INIFAP consideran que este insecto podría emerger como plaga relevante en varios estados. En 2023, en Durango, se presentó una infestación sin precedentes que requirió aplicaciones múltiples de insecticida (José C. Jiménez-Galindo, investigador del INIFAP, Cuauhtémoc, Chihuahua, comunicación personal, 8 de agosto, 2024). El problema se ha observado también en parcelas experimentales y comerciales en Guanajuato (Figura 2a-2d) y Querétaro (Jorge A. Acosta-Gallegos, investigador del INIFAP, Celaya, Guanajuato, comunicación personal, 20 de noviembre, 2024), mientras que en Nayarit su incidencia es recurrente (Nadia C. García-Álvarez, investigador del INIFAP, Santiago



a) Aspecto general de daño en un cultivo de frijol bajo condiciones de riego; b) Síntomas de toxemia por chicharrita durante la etapa vegetativa: amarillamiento, deformación y enrollamiento de folíolos, reducción del crecimiento de entre nudos y achaparramiento de plantas (flecha celeste); c) Síntomas de defoliación, necrosis y daño en vainas en la etapa de llenado de vainas (flecha roja); d) Chicharrita (*Empoasca* spp) presente en el cultivo (flecha amarilla).

■ **Figura 2. Daño por *Empoasca* spp en la producción de frijol durante el ciclo primavera-verano 2024 en el Campo Experimental Bajío.**

Figure 2. Damage caused by *Empoasca* spp in common bean production during the spring-summer 2024 cycle at Bajío Experimental Station.

Ixcuintla, Nayarit, comunicación personal, 8 de enero, 2025). Estas observaciones recientes de infestaciones inusuales de *Empoasca* spp podrían estar relacionadas con los cambios en los patrones climáticos, ya que la temperatura es un factor dominante en la regulación de las poblaciones de insectos, lo que requiere de una investigación rigurosa para establecer la relación entre los factores del cambio climático, como la sequía y las temperaturas altas, con la dinámica de las poblaciones insectiles y los virus, toda vez que la mayoría de los virus de plantas son transmitidos por insectos vectores en sistemas biológicos complejos que incluyen múltiples plantas hospederas, virus, vectores y sus endosimbiontes bacterianos. La incidencia temprana y prolongada de clima cálido puede alterar estas interacciones, incrementando el riesgo de nuevas enfermedades virales y brotes en la agricultura y los ecosistemas naturales (Sharma y col., 2020).

El frijol es una de las leguminosas más susceptibles a las enfermedades virales, con pérdidas de rendimiento de hasta 100 %, dependiendo de la época de cultivo, densidad de vectores y especie viral (Morales y Castaño, 2008). En diversas especies vegetales, el incremento en la temperatura ambiental puede potenciar la propagación viral sistémica y de célula a célula (Amari y col., 2021). Además, bajo condiciones de estrés, que reflejan escenarios extremos previstos por el cambio climático, las semillas infectadas pueden ser más viables que las no infectadas, lo que incrementa la prevalencia y persistencia viral en la población hospedante (Gutiérrez-Sánchez y col., 2023).

La temperatura modula las epidemias virales a nivel de micro y macroclima, afectando tanto los procesos en la planta (acumulación y movimiento viral), como las interacciones ecológicas (dinámica y comportamiento de vectores, características del hospedero y supervivencia de reservorios virales) (Sharma y col., 2020; Tsai y col., 2022). Estas alteraciones pueden afectar la virulencia y patogenicidad de los virus de plantas, lo que in-

crementa la frecuencia y escala de los brotes de las enfermedades que producen (Trebicki, 2020).

La complejidad de las interacciones insecto-virus se evidencia en los distintos mecanismos de transmisión. *B. tabaci* transmite al frijol los virus BGMV, BGYMV, el virus del moteado suave del caupí (CPMMV, por sus siglas en inglés: cowpea mild mottle virus) y otros begomovirus (Ferreira y col., 2024); mientras que diversas especies de áfidos transmiten al BCMV y al BCMNV (Morales y Castaño, 2008). Adicionalmente, es frecuente detectar el fenómeno de coinfección, que implica la presencia de varias especies virales en una misma planta. Esto puede resultar en interacciones de neutralismo, sinergismo, antagonismo y sinergismo/antagonismo entre virus, con implicaciones significativas para el desarrollo de enfermedades, la expresión de síntomas y la epidemiología viral (Moreno y López-Moya, 2020; Singhal y col., 2021).

En México, se han detectado infecciones simples y mixtas de BCMV y BCMNV en siembras de frijol en los estados de Guanajuato, Jalisco y Nayarit. En el último se ha identificado además la coinfección con CPMMV, BGYMV y el virus latente del frijol (BLV). De estas especies, BCMV, BCMNV y BGYMV destacan por su incidencia y la severidad de los daños que ocasionan (Chiquito-Almanza y col., 2018; Martínez-Marrero y col., 2020; Chiquito-Almanza 2021). Los principales virus que infectan al frijol, identificados en México, sus mecanismos de transmisión, síntomas que producen y los genes usados en programas nacionales para el mejoramiento de variedades de frijol resistentes se resumen en la Tabla 2.

Aplicar medidas de control adecuadas requiere conocer aspectos biológicos, epidemiológicos, patológicos y ecológicos, tanto de los virus como de sus vectores. BCMV y BCMNV causan mosaico común (Figura 3a) cuando infectan variedades sin genes de resistencia, mientras que el BCMNV produce raíz negra (también conocida como necrosis apical) en varie-

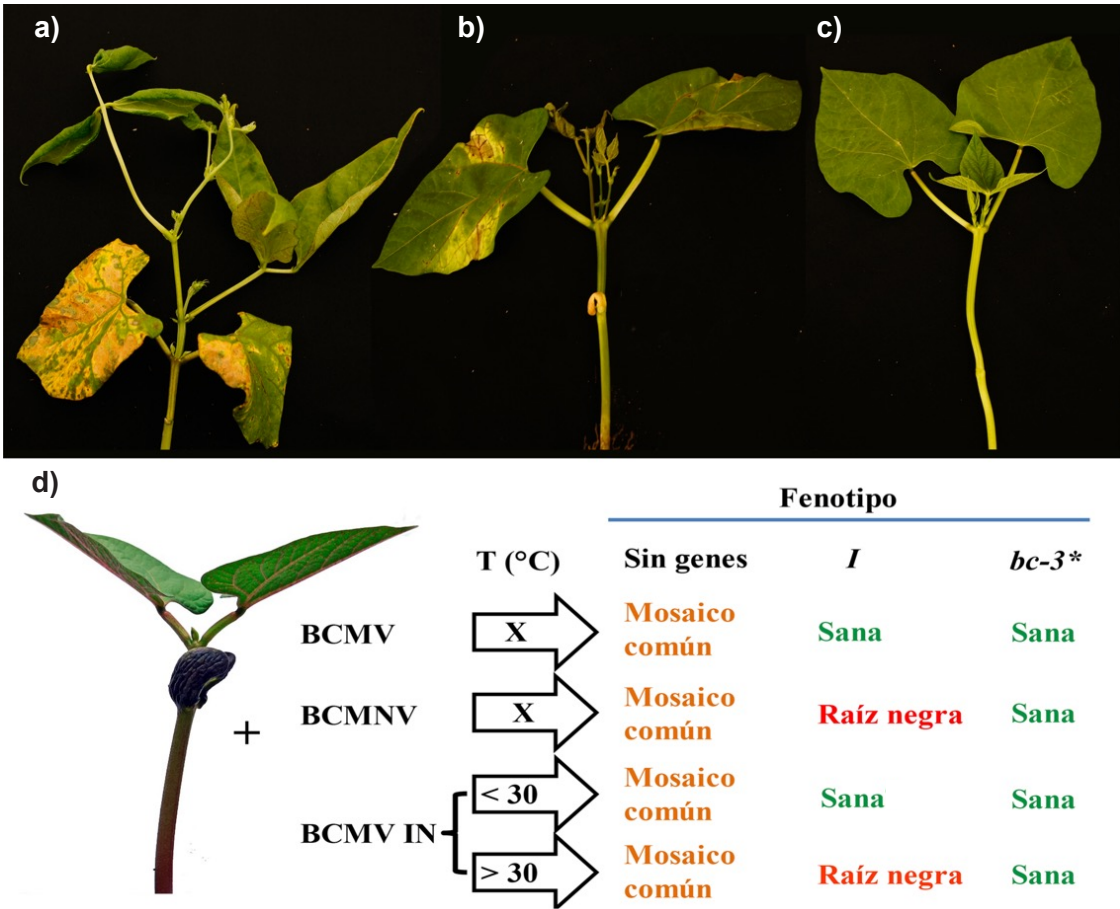
■ Tabla 2. Virus detectados en frijol, insectos vectores, mecanismos de transmisión y principales genes de resistencia usados en el mejoramiento genético en México.

Table 2. Viruses detected in common bean, insect vectors, transmission mechanisms and main resistance genes used in genetic improvement in Mexico.

Acrónimo	Familia/ Género	Síntomas principales	Transmisión	Genes de resistencia	Regiones afectadas
Virus del mosaico común del frijol					
BCMV	Potviridae/ Potyvirus	Mosaico común en variedades sin genes de resistencia; raíz negra en el caso de algunas cepas inductoras de necrosis sistémica dependiente de la temperatura en interacción con variedades portadoras del gen <i>I</i> sin la protección de genes recesivos.	Semilla infectada y varias especies de áfidos (no persistente)	<i>I</i> , <i>bc-1</i> , <i>bc-2</i> , <i>bc-3</i> , <i>bc-4</i> y <i>bc-u^d</i>	Nacional
Virus de la necrosis del mosaico común del frijol					
BCMNV	Potviridae/ Potyvirus	Mosaico común en variedades sin genes de resistencia; raíz negra en interacción con variedades portadoras del gen <i>I</i> sin la protección de genes recesivos.	Semilla infectada y varias especies de áfidos (no persistente)	<i>I</i> , <i>bc-1</i> , <i>bc-2</i> , <i>bc-3</i> , <i>bc-4</i> y <i>bc-u^d</i>	Nacional
Virus del mosaico amarillo dorado del frijol					
BGYMV	Geminiviridae/ Begomovirus	Amarillamiento sistémico, aborto floral, deformación de vainas	Mosquita blanca (persistente de manera circulativa)	<i>bgm-1</i>	Trópico, Chiapas y Nayarit
Virus del moteado suave del caupí					
CPMMV	Betaflexivirida/ Carlavirus	Moteado suave, clorosis leve, e infecciones asintomáticas	Mosquita blanca (No persistente)	Desconocidos	Guanajuato, Jalisco y Nayarit

Continúa...

Virus latente del frijol					
BLV	Geminiviridae/ Begomovirus	Asintomático	Desconocida	Desconocidos	Guanajuato, Jalisco, Nayarit y Veracruz
Virus del mosaico severo del frijol					
PvSMV	Secoviridae/ Comovirus	Mosaico severo, síntomas similares a “raíz negra”	Desconocida	Desconocidos	Guanajuato



Plantas inoculadas con la cepa BCMNV NL-3. a) mosaico común en una variedad susceptible (sin genes de resistencia); b) raíz negra en una variedad que porta únicamente el gen *I*; c) resistencia en una variedad que porta los genes *I* + *bc-3*; d) efecto de la temperatura y la especie viral en interacción con los genes de resistencia *bc-3* e *I* en el desarrollo del mosaico común y la raíz negra. X: cualquier temperatura. BCMNV IN: cepas de BCMV inductoras de necrosis sistémica dependiente de la temperatura. Excepto para la cepa BCMV RU1M, que produce raíz negra independientemente de la temperatura. *Para que el gen *bc-3* confiera resistencia requiere la presencia del gen *bc-u*^d).

■ **Figura 3.** Respuesta de plantas de frijol portadoras de diferentes genes de resistencia al BCMV y BCMNV, y su interacción con la temperatura.
Figure 3. Response of common bean plants carrying different resistance genes to BCMV and BCMNV, and their interaction with temperature.

dades portadoras del gen *I* sin la protección de genes recesivos (Figura 3b), al igual que algunas cepas de BCMV por efecto del incremento de temperatura (Figura 3d), como se detalla en la siguiente sección (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000). Los dos virus se han detectado en la mayoría de las regiones productoras de frijol en México (Flores-Estevés y col., 2003; Chiquito-Almanza y col., 2021), y pueden transmitirse al embrión de variedades susceptibles con tasas de hasta 80 %, por lo que la semilla infectada es su principal medio de diseminación. La transmisión secundaria es realizada por diversas especies de áfidos de manera no persistente dentro y fuera del cultivo, lo que favorece la perpetuación del agente etiológico y el inicio de nuevos ciclos de la enfermedad (Morales y Castaño, 2008). El BCMV puede ocasionar una reducción en el rendimiento de entre 53 % y 83 % (Sastry, 2013).

El BGYMV se encuentra principalmente en áreas tropicales como Chiapas y Nayarit (Garrido-Ramírez y col., 2000; Chiquito-Almanza y col., 2021). Los genotipos susceptibles infectados en las primeras etapas de desarrollo presentan amarillamiento sistémico intenso y pueden tener pérdidas totales, debido al aborto de flores y la deformación de las vainas (Morales y Niessen, 1988). En el trópico de México se han reportado pérdidas de rendimiento atribuidas a este virus en variedades susceptibles como 'Negro Jamapa' (87.6 %), 'Negro Tacaná' (18 %) y 'Negro Huasteco-81' (40.5 %) (López-Salinas y col., 1993). La transmisión del BGYMV se realiza de manera persistente por *B. tabaci* con un periodo de latencia de 4 h a 48 h (Morales y Anderson, 2001). La incidencia de la enfermedad y la magnitud de las pérdidas varían dependiendo de las poblaciones del vector, la susceptibilidad de la variedad, las prácticas culturales, y las condiciones ambientales, principalmente la precipitación pluvial, que afectan a las poblaciones de *B. tabaci* (Morales y Anderson, 2001). Adicionalmente, es común que este virus cause deformación y enanismo de la planta, así como aborto de flores en genotipos de frijol de la raza Me-

soamericana, particularmente en condiciones de temperatura alta (Morales y Niessen, 1988).

Los diferentes mecanismos de transmisión y la biología de los virus y vectores determinan las prácticas de manejo. Por ejemplo, para BGYMV, que no se transmite por semilla y requiere un periodo de incubación en el insecto antes de poder transmitirse, las estrategias se basan en reducir las poblaciones del vector mediante insecticidas, barreras vegetales y la siembra en épocas con menor incidencia de mosquita blanca. En contraste, para BCMV y BCMNV, la estrategia de control más adecuada y económica es la resistencia genética, ya que su principal medio de diseminación es la semilla infectada y el control del vector tiene poca eficacia, pues este puede transmitir los virus segundos después de alimentarse de una planta infectada (Morales y Castaño, 2008).

Influencia de temperaturas altas en la ruptura de resistencia a BCMV y BCMNV

La presencia del gen *I* como estrategia de mejoramiento genético de las variedades de frijol desarrolladas por el INIFAP, destinadas a diferentes regiones (Anaya-López y col., 2021), es de gran importancia para la producción de frijol en el país. Sin embargo, la efectividad de esta resistencia puede verse comprometida por factores ambientales, particularmente la temperatura, lo que representa un riesgo potencial para la seguridad alimentaria nacional.

En variedades que portan únicamente el gen *I*, sin la protección de genes recesivos, se produce la raíz negra a cualquier temperatura por la interacción con el BCMNV (Figura 3b) y con algunas cepas de BCMV como la recombinante RU1M (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000; Feng y col., 2014). La combinación del gen *I* con el gen recesivo *bc-3* confiere resistencia al BCMNV (Figura 3c), y a la mayoría de las cepas de BCMV descritas (Drijfhout y col., 1978; Soler-Garzón y col., 2021a; 2021b). El gen *I* induce una respuesta hipersensible contra el BCMNV independientemente de la temperatura (Figura 3d), que resulta en ne-

crosis sistémica y que frecuentemente causa la muerte de la planta, aunque evita la diseminación del virus por medio de la semilla infectada (Drijfhout y col., 1978). Este gen confiere alta resistencia o incluso inmunidad completa a la mayoría de las cepas del BCMV por debajo de 30 °C (Figura 3d). Sin embargo, por encima de esta temperatura, algunas cepas del BCMV como NL2 y NL6, denominadas “cepas inductoras de necrosis dependiente de la temperatura”, inducen síntomas de necrosis sistémica (Figura 3d) (Drijfhout y col., 1978; Collmer y col., 2000).

En 2024, en coincidencia con el calor extremo, se observaron síntomas de necrosis apical en plantas de frijol en los campos experimentales del CEBAJ (Figuras 4a y 4b). Aunque no se confirmó el agente viral responsable, es necesario realizar estudios de identificación, ya que esos síntomas pueden ser causados por diferentes virus, incluyendo BCMNV, ciertas cepas de BCMV u otros virus emergentes como el virus del mosaico severo del frijol (PvSMV). Esta investigación es especialmente importante si las condiciones climáticas extremas persisten.

Los mecanismos moleculares subyacentes a la necrosis inducida por temperatura aún no

están claros. Se ha propuesto que la expresión del gen *I* está regulada negativamente por la temperatura. Como resultado, la cantidad de proteína *I* que se produce es baja para conferir resistencia confiable a temperaturas altas. También es posible que, la respuesta inmune inducida por este gen (y su proteína expresada) se vea atenuada por la temperatura alta (Collmer y col., 2000).

El gen *I* es útil en regiones con baja incidencia de BCMNV, ya que, al morir la planta (por efecto de la respuesta hipersensible), se reduce la diseminación del virus a través de la semilla. Sin embargo, no es adecuado en zonas con temperaturas elevadas o incidencia alta de especies o cepas inductoras de necrosis, como ocurre en Nayarit. Para esas condiciones, se requieren genes recesivos que puedan actuar de forma específica contra cepas virales de interés. Hasta ahora se han identificado 5 genes recesivos que podrían ser utilizados: *bc-1*, *bc-2*, *bc-3*, *bc-4* y *bc-u^d* (Drijfhout y col., 1978; Soler-Garzón y col., 2021a; 2021b).

El gen *bc-3* es el más estudiado, este se encuentra en el cromosoma 6 del frijol y codifica el factor de inicio de la traducción eucariótica 4E (eIF4E). La combinación de *bc-3* y *bc-u^d* puede proteger al frijol de la infección



a) Síntomas de necrosis apical en una variedad de tipo Negro; b) Planta muerta con síntomas similares a raíz negra; c) Síntomas de necrosis inducidos por el virus del mosaico severo del frijol (PvSMV).

■ **Figura 4. Síntomas de necrosis en frijol cultivado durante el ciclo primavera-verano 2024 en el Campo Experimental Bajío, INIFAP.**

Figure 4. Necrosis symptoms in common bean cultivated during the spring-summer 2024 cycle at Bajío Experimental Station, INIFAP.

por todas las cepas de BCMV (Drijfhout y col., 1978), excepto a BCMV-1755a (Feng y col., 2015), y es hasta ahora la mejor opción de resistencia a cepas inductoras de necrosis.

Es importante estudiar el origen de la presencia de raíz negra observada en los lotes experimentales del CEBAJ (Figuras 4a y 4b), para establecer si el fenómeno está relacionado con el aumento de temperatura, en combinación con una mayor incidencia de BCMNV o de cepas de BCMV inductoras de necrosis. Un resultado positivo a esta hipótesis indicaría la necesidad de incorporar el gen *bc-3* en las nuevas variedades. Aunque, también es probable que esté relacionado con el brote de una nueva especie viral.

El virus del mosaico severo del frijol (PvSMV), descubierto por primera vez en el CEBAJ (Chiquito-Almanza y col., 2020) es un comovirus que provoca síntomas similares a raíz negra (Figura 4c), por lo que es crucial confirmar la presencia y distribución de dichas especies virales. Los comovirus típicamente son transmitidos por crisomélidos (Coleoptera: Chrysomelidae) y por medios mecánicos, aunque algunos, como el virus latente 1 de *Arabidopsis* (ArLV1), pueden transmitirse a la semilla (Verhoeven y col., 2023). Esta diversidad en los mecanismos de transmisión resalta la importancia de investigar las vías de transmisión del PvSMV para comprender mejor su epidemiología.

Perspectivas para el manejo integrado bajo el cambio climático

En el escenario actual del cambio climático se requiere implementar estrategias de manejo integrado que consideren tanto los factores bióticos como abióticos que afectan la producción de frijol. El enfoque debe incluir medidas preventivas, sistemas de monitoreo y prácticas adaptativas que permitan mitigar los efectos conjuntos del incremento de temperatura y la variabilidad de las precipitaciones, ya que su efecto combinado es mayor que cuando se presentan individualmente (Appiah-Kubi y col., 2022).

En relación con las plagas, la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (IPPC, 2021) recomienda prácticas de manejo que incluyen la producción y uso de semillas y materiales libres de patógenos, establecimiento de sistemas de alerta temprana, herramientas de diagnóstico precisas, tratamientos efectivos para las semillas, variedades resistentes, adopción de prácticas culturales que fomenten la sanidad vegetal, manejo integrado de plagas, aplicación rigurosa de medidas de higiene y empleo de productos biológicos para la protección de cultivos.

Mitigar el impacto de la sequía y las altas temperaturas requiere la implementación de medidas a corto y largo plazo. Las medidas a corto plazo se basan en prácticas agronómicas adaptativas relacionadas con el manejo del suelo, el uso de sistemas de riego eficientes y prácticas culturales como la labranza de conservación, el manejo de residuos de cultivo, los cultivos de cobertura, el uso de biocarbón y el acolchado, así como la selección de las variedades más apropiadas (Lamaoui y col., 2018; Wang y Ren, 2025). Entre las medidas de largo plazo se encuentran la construcción de reservorios, el mejoramiento de sistemas de alerta temprana y el desarrollo de variedades resistentes (Wang y Ren, 2025). Estas prácticas deben implementarse de manera integrada, considerando las condiciones de cada región productora y las proyecciones climáticas locales, pues su efectividad puede ser específica para cada región, y algunas pueden tener consecuencias no deseadas en la calidad ambiental.

La investigación del frijol en México requiere un enfoque interdisciplinario. Entre las prioridades se incluyen: la identificación de nuevas áreas aptas para su producción, el desarrollo de variedades tolerantes a temperaturas altas mediante selección bajo condiciones de estrés controladas (evaluando características como viabilidad del polen y carga de vainas), la introgresión de los genes *I* y *bc-3*, el monitoreo del clima y de las poblaciones de insectos y virus, así como el desarrollo de tec-

nologías de manejo integrado basadas en modelos predictivos (Skendžić y col., 2021; Jeger y col., 2023; Subedi y col., 2023; Alfizar y Nasution, 2024). Estas estrategias requieren concordancia con la región productora, considerando la interacción entre estrés térmico y problemas fitosanitarios, por lo que probablemente se requerirá de variedades específicas de nicho (del-Canto y col., 2025).

La identificación precisa de vectores y especies virales, junto con la predicción del efecto de temperaturas altas sobre enfermedades y plagas de frijol, son esenciales para adoptar medidas efectivas. La inclusión de herramientas moleculares en el diagnóstico es estratégica; por ejemplo, la secuenciación masiva para la identificación de virus (Anaya-López y col., 2025a), y en el caso de las chicharritas, el código de barras de ADN, que complementa la identificación morfológica tradicional y permite la caracterización precisa de especies en cualquier etapa de su ciclo de vida (Emam y col., 2020). Estas herramientas y el conocimiento generado sentarán bases para desarrollar variedades resistentes, sistemas de alerta temprana y métodos de manejo integrado que eviten pérdidas severas de producción y contribuyan a la sostenibilidad alimenticia.

Actualmente, en México se carece de un sistema centralizado de registro y monitoreo de pérdidas en frijol atribuibles al cambio climático, lo que dificulta cuantificar el impacto económico y social, así como evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Un sistema que integre datos climáticos, fitosanitarios y económicos de las distintas regio-

nes productoras, con la participación coordinada de instituciones de investigación, organizaciones de productores y dependencias gubernamentales, orientará políticas públicas, investigación y transferencia de tecnología que garanticen la seguridad alimentaria de este cultivo básico en México.

CONCLUSIONES

El incremento de la temperatura ambiental, efecto asociado al cambio climático, representa una amenaza emergente para la producción de frijol en México. Las pérdidas confirmadas experimentalmente por el INIFAP, durante el ciclo otoño-invierno 2024, alertan sobre la vulnerabilidad del cultivo a temperaturas extremas. La evidencia científica indica que las altas temperaturas pueden afectar tanto la fisiología reproductiva del cultivo como alterar la dinámica de plagas y enfermedades virales, lo que podría ser consistente con las observaciones de campo que necesitan ser confirmadas. Ante esta situación se requieren estrategias integrales que incluyen: el desarrollo de variedades tolerantes a temperaturas altas portadoras de los genes *I* y *bc-3* de resistencia a BCMV y BCMNV, el monitoreo sistemático de virus y plagas emergentes, la adaptación de tecnologías de manejo integrado, y la identificación de áreas alternativas de producción. Estas medidas son fundamentales para preservar la seguridad alimentaria de México, donde el frijol constituye un pilar de la dieta nacional.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

Acosta-Gallegos, J. A., Anaya-López, J. L., Uresti-Gil, J., Chiquito-Almanza, E., Guerrero-Aguilar, B. Z. y Jiménez-Hernández, Y. (2021). Mejoramiento genético del frijol en la región de El Bajío de México. En A. V. Ayala-Garay Garay, J. A. Acosta-Gallegos y L. Reyes-Muro (Eds.). *El cultivo del frijol presente y futuro para México* (pp. 83-97). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y

Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_EL_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf. Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2025.

Acosta-Gallegos, J. A., Jiménez-Hernández, Y., García-Álvarez, N. C., Rojas-Tovar, M., Chiquito-Alman-

- za, E. y Anaya-López, J. L. (2020). 'San Blas': variedad de frijol Negro Opaco resistente a BCMV y BCMNV para Nayarit y El Bajío de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1701-1707. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.1963>
- Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Jiménez-Hernández, Y., Anaya-López, J. L. y Gonzalez-Chavira, M. M. (2014). 'Dalia', nueva variedad de frijol de grano tipo Flor de Junio para la región centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 331-336. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i2.971>
- Acosta-Gallegos, J. A., Sánchez-García, M. B., Ocampo-Hernández, J. y Jiménez-Hernández, Y. (2013). Guía para la producción de frijol. En A. Mandujano-Bueno, R. Paredes-Melesio, M. P. Alamilla-Gómez, y J. F. Buenrostro-Rodríguez (Eds.), *Guía para la producción de Maíz, Frijol, Trigo y Sorgo en Guanajuato* (pp. 82-112). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Alfizar & Nasution, S. S. (2024). The explosion of pests and diseases due to climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1297(1), 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1297/1/012072>
- Amari, K., Huang, C., & Heinlein, M. (2021). Potential impact of global warming on virus propagation in infected plants and agricultural productivity. *Frontiers in Plant Science*, 12, 649768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.649768>
- Anaya-López, J. L., Chiquito-Almanza, E., Acosta-Gallegos, J. A., Tosquy-Valle, O. H., Montero-Tavera, V., & González-Pérez, E. (2025a). Diagnosis and characterization of plant viruses in Mexico using HTS: an approach to guide virus management and marker assisted selection. *Discover Plants*, 2(1), 246. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00332-y>
- Anaya-López, J. L., Guerrero-Aguilar, B. Z., Jiménez-Hernández, Y., Chiquito-Almanza, E., Prado-García, A. A. y Acosta-Gallegos, J. A. (2025b). 'San Luis 22': variedad de frijol negro brillante de temporal para el centro-norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(2), e3411. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3411>
- Anaya-López, J. L., Ibarra-Pérez, F. J., Rodríguez-Cota, F. G., Ortega-Murrieta, P. F., Chiquito-Almanza, E. y Acosta-Gallegos, J. A. (2021). Leguminosas de grano en México: variedades mejoradas de frijol y garbanzo desarrolladas por el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(25), 63-75. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2827>
- Anaya-López, J. L., Rojas-Tovar, L. M., Cisneros-López, H. C., & Acosta-Gallegos, J. A. (2022). Seed yield and harvest index of Pinto and Flor de Mayo dry beans germplasm under stress by high temperature. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 33-41.
- Appiah-Kubi, D., Asibuo, J. Y., Butare, L., Yeboah, S., Appiah-Kubi, Z., Kena, A. W., Tuffour, H. O., & Akromah, R. (2022). Heat stress tolerance: A prerequisite for the selection of drought-and low phosphorus-tolerant common beans for equatorial tropical regions such as Ghana. *Plants*, 11(18), 2352. <https://doi.org/10.3390/plants11182352>
- Assefa, T., Assibi-Mahama, A., Brown, A. V., Cannon, E. K. S., Rubyogo, J. C., Rao, I. M., Blair, M. W., & Cannon, S. B. (2019). A review of breeding objectives, genomic resources, and marker-assisted methods in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Molecular Breeding*, 39(2), 20. <https://doi.org/10.1007/s11032-018-0920-0>
- Backus, E. A., Serrano, M. S., & Ranger, C. M. (2005). Mechanisms of hopperburn: an overview of insect taxonomy, behavior, and physiology. *Annual Review of Entomology*, 50(1), 125-151. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123310>
- Barrera, S., Berny-Mier y Teran, J. C., Aparicio, J., Díaz, J., Leon, R., Beebe, S., Urrea, C. C., & Gepts, P. (2024). Identification of drought and heat tolerant tepary beans in a multi-environment trial study. *Crop Science*, 64(6), 3399-3416. <https://doi.org/10.1002/csc2.21354>
- Barrios-Gómez, E. J. y López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35.
- Basit, M., Saeed, S., Saleem, M. A., & Zulfiqar, R. (2016). Population dynamics of sunflower insect pests and their natural enemies. *Sarhad Journal of Agriculture*, 32(4), 417-423. | <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2016/32.4.417.423>
- Beebe, S., Ramírez-Villegas, J., Álvarez, P., Ricaurte, J., Mora, A., Guerrero, A. F., Rosas, J. C., Rodríguez-Baide, J. M., & van-den-Berg, M. (2017). Modelación del frijol en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización, EUR. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <http://dx.doi.org/10.2760/325955, JRC110112>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Butare, L. (2009). Breeding for abiotic stress tolerance in com-

mon bean: Present and future challenges. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 41, 1-10.

Chiquito-Almanza, E., Caballero-Pérez, J., Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Mariscal-Amaro, L. A., & Anaya-López, J. L. (2021). Diversity and distribution of viruses infecting wild and domesticated *Phaseolus* spp. in the Mesoamerican Center of domestication. *Viruses*, 13(6), 1153. <https://doi.org/10.3390/v13061153>

Chiquito-Almanza, E., Caballero-Pérez, J., Guevara-Olvera, L., Acosta-García, G., Pérez-Pérez, M. C. I., Acosta-Gallegos, J. A., & Anaya-López, J. L. (2018). First report of cowpea mild mottle virus infecting cultivated and wild *Phaseolus* in the Central-Western region of Mexico. *Plant Disease*, 102(5), 1047-1047. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-17-0990-PDN>

Chiquito-Almanza, E., Zamora-Aboytes, J. M., Medina, H. R., Acosta-Gallegos, J. A., & Anaya-López, J. L. (2020). Complete genome sequence of a novel comovirus infecting common bean. *Archives of Virology*, 165(6), 1505-1509. <https://doi.org/10.1007/s00705-020-04610-w>

CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical (2015). *Developing Beans That Can Beat the Heat*; Tech. Report; International Center for Tropical Agriculture: Cali, Colombia. [En línea]. Disponible en: [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/DEVELOPING_BEANS_THAT_CAN_BEAT_THE_HEAT_lowres%20\(2\).pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/DEVELOPING_BEANS_THAT_CAN_BEAT_THE_HEAT_lowres%20(2).pdf). Fecha de consulta: 20 de mayo de 2024.

Collmer, C. W., Marston, M. F., Taylor, J. C., & Jahn, M. (2000). The I gene of bean: A dosage-dependent allele conferring extreme resistance, hypersensitive resistance, or spreading vascular necrosis in response to the potyvirus Bean common mosaic virus. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 13(11), 1266-1270. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2000.13.11.1266>

Del-Canto, A., De-Diego, N., Sanz-Sáez, Á., Štefelo-vá, N., Pérez-López, U., Mena-Petite, A., & Lacuesta, M. (2025). Organic management and local genotypes for elevating yield and seed quality to confront climate change challenges. *European Journal of Agronomy*, 168, 127613. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127613>

Deutsch, C. A., Tewksbur, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate, *Science*, 361, 916-919. <https://doi.org/10.1126/science.1257566>

[org/10.1126/science.1257566](https://doi.org/10.1126/science.1257566)

Drijfhout, E., Silbernagel, M. J., & Burke, D. W. (1978). Differentiation of strains of bean common mosaic virus. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 84, 13-26. <https://doi.org/10.1007/BF01978099>

Emam, A. K., Ibrahim, H. E., Helmi, A., & Sharaf, A. (2020). Identification of some Egyptian leafhopper species (Hemiptera: Cicadellidae) using DNA barcoding. *Biologia*, 75, 1337-1346. <https://doi.org/10.2478/s11756-019-00384-y>

Espinosa-García, J. A., Acosta-Gallegos, J. A., Vélez-Izquierdo, A. y Jolalpa-Barrera, J. L. (2021). Mercado potencial de semilla de variedades mejoradas de frijol para riego y temporal. En A. V. Ayala-Garay, J. A. Acosta-Gallegos y L. Reyes-Muro (Eds.). *El cultivo del frijol presente y futuro para México* (pp. 145-161). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_El_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf

Feng, X., Myers, J. R., & Karasev, A. V. (2015). Bean common mosaic virus isolate exhibits a novel pathogenicity profile in common bean, overcoming the *bc-3* resistance allele coding for the mutated eIF4E translation initiation factor. *Phytopathology*, 105(11), 1487-1495. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0108-R>

Feng, X., Poplawsky, A. R., & Karasev, A. V. (2014). A recombinant of Bean common mosaic virus induces temperature-insensitive necrosis in an *I* gene-bearing line of common bean. *Phytopathology*, 104(11), 1251-1257. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-14-0048-R>

Ferreira, A. L., Ghanim, M., Xu, Y., & Pinheiro, P. V. (2024). Interactions between common bean viruses and their whitefly vector. *Viruses*, 16(10), 1567. <https://doi.org/10.3390/v16101567>

FGP, Fundación Guanajuato Produce (2025). Red de estaciones Agroclimáticas del estado de Guanajuato. [En línea]. Disponible en: <https://www.estaciones.fundacionguanajuato.mx/home.php>. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.

FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2023). Panorama agroalimentario frijol 2023. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. [En línea]. Disponible en:

<https://www.fira.gob.mx/InvYEvalEcon/EvaluacionIF>. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2024.

Flores-Esteves, N., Acosta-Gallegos, J. A., & Silva-Rosales, L. (2003). Bean common mosaic virus and bean common mosaic necrosis virus in Mexico. *Plant Disease*, 87(1), 21-25. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.21>

Garrido-Ramírez, E. R., Sudarshana, M. R., & Gilbertson, R. L. (2000). Bean golden yellow mosaic virus from Chiapas, Mexico: Characterization, pseudorecombination with other bean-infecting geminiviruses and germ plasm screening. *Phytopathology*, 90(11), 1224-1232. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.11.1224>

Gehlot, L. & Prajapat, A. K. (2021). Seasonal incidence of insect pests on mungbean (*Vigna radiata*) in correlation with meteorological data. *Agricultural Science Digest-A Research Journal*, 41(spl), 199-202. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5222>

Gross, Y. & Kigel, J. (1994). Differential sensitivity to high temperature of stages in the reproductive development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research*, 36(3), 201-212. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90112-0)

Gutiérrez-Sánchez, Á., Cobos, A., López-Herranz, M., Canto, T., & Pagán, I. (2023). Environmental conditions modulate plant virus vertical transmission and survival of infected seeds. *Phytopathology*, 113(9), 1773-1787. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-22-0448-V>

Ibarra-Perez, F. J., Tosquy-Valle, O. H., Rodríguez-Rodríguez, J. R., Villar-Sánchez, B., López-Salinas, E. y Anaya-López, J. L. (2022). Rubí: nueva variedad mejorada de frijol negro para las áreas tropicales de Veracruz y Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 577-585. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2227>

IPPC, International Plant Protection Convention (2021). Scientific review of the impact of climate change on plant pests – A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. <https://doi.org/10.4060/cb4769en>

Jacinto-Hernández, C., Coria-Peña, M., Contreras-Santos, G., Martínez-López, L., Zapata-Martelo, E. y Ayala-Carrillo, M. R. (2019). Azúcares totales y proteína en frijol nativo de la región Triqui Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1667-1674. <https://doi.org/10.29312/remexca.v>

10i7.2114

Jeger, M., Hamelin, F., & Cuniffe, N. (2023). Emerging themes and approaches in plant virus epidemiology. *Phytopathology*, 113(9), 1630-1646. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0378-V>

Jiménez-Hernández, Y., Montero-Tavera, V., Anaya-López, J. L., Jiménez-Galindo, J. C., Herrera-Hernández, G., Guerrero-Aguilar, B. Z. y Acosta-Gallegos, J. A. (2018). Salinas: nueva variedad de frijol pinto para áreas de temporal de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1295-1301. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1589>

Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*, 6, 26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026>

Lehmann, P., Ammunét, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S. D., Jepsen, J. U., Kalinkat, G., Neuvoonen, S., Niemelä, P., Terblanche, J. S., Økland, B., & Björkman, C. (2020). Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(3), 141-150. <https://doi.org/10.1002/fee.2160>

Lone, A. A., Khan, M. N., Gul, A., Dar, Z. A., Iqbal, A. M., Lone, B. A., Ahangar, A., Ur-Rasool, F., Habib-Khan, M., Ali, G., Nisar, F., & Fayaz, A. (2021). Common beans and abiotic stress challenges. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(14), 41-53. <http://www.sdiarticle4.com/review-history/69745>

López-Salinas, E., Becerra-Leonor, E. N., Acosta-Gallegos, J. A. y Villar-Sánchez, B. (1993). Variedades de frijol tolerantes al virus del mosaico dorado para el trópico de México. *Agricultura Técnica en México*, 19(2), 99-109.

Martínez-Marrero, N., Avalos-Calleros, J. A., Chiquito-Almanza, E., Acosta-Gallegos, J. A., Ambriz-Granados, S., Anaya-López, J. L., & Argüello-Astorga, G. R. (2020). A new begomovirus isolated from a potyvirus-infected bean plant causes asymptomatic infections in bean and *N. benthamiana*. *Archives of Virology*, 165(7), 1659-1665. <https://doi.org/10.1007/s00705-020-04646-y>

Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G. y Zarázua-Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(SPE13), 2465-2474. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>

- Morales, F. J. & Anderson, P. K. (2001). The emergence and dissemination of whitefly-transmitted geminiviruses in Latin America. *Archives of Virology*, 146(3), 415-441. <https://doi.org/10.1007/s007050170153>
- Morales, F. J. y Castaño, J. M. (2008). Enfermedades virales del frijol común en América Latina. Publicación No. 364. Centro Internacional de Agricultura tropical (CIAT), Cali, Colombia. [En línea]. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/SB327.E56_C.3_Enfermedades_Virales_del_Fr%C3%ADjol_Com%C3%BAAn_en_Am%C3%A9rica_Latina.pdf Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2025.
- Morales, F. J. & Niessen, I. 1988. Comparative responses of selected *Phaseolus vulgaris* germplasm inoculated artificially and naturally with bean golden mosaic virus. *Plant Disease*, 72(12), 1020-1023.
- Moreno, A. B. & López-Moya, J. J. (2020). When viruses play team sports: Mixed infections in plants. *Phytopathology*, 110(1), 29-48. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-19-0250-FI>
- Prado-García, A. A., Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Yáñez-López, R., Ramírez-Pimentel, J. G., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2025). Identification of common bean genotypes tolerant to the combined stress of terminal drought and high temperature conditions. *Agronomy*, 15(7), 1624; <https://doi.org/10.3390/agronomy15071624>
- Rainey K. M. & Griffiths P. D. (2005). Differential response of common bean genotypes to high temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 130(1), 18-23. <https://doi.org/10.21273/JASHS.130.1.18>
- Reddy, P. P. (2018). Emerging crop pest problems: redefining management strategies. [En línea]. Disponible en: <https://www.scientificpubonline.com/bookdetail/emerging-crop-pest-problems-redefining-management-strategies/9789386652249/0>. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2024.
- Rodríguez-Licea, G., García-Salazar, J. A., Rebollar-Rebollar, S. y Cruz-Contreras, A. C. (2010). Preferencias del consumidor de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma Económico*, 2(1), 121-145.
- Rose, T., Lowe, C., Miret, J. A., Walpole, H., Halsey, K., Venter, E., Urban, M. O., Buendía, H. F., Kurup, S., O'Sullivan, D. M., Beebe, S., & Heuer, S. (2023). High temperature tolerance in a novel, high-quality *Phaseolus vulgaris* breeding line is due to maintenance of pollen viability and successful germination on the stigma. *Plants*, 12(13), 2491. <https://doi.org/10.3390/plants12132491>
- Sánchez-Castro, A., Miranda-Cabrera, I., Quiñones-Pantoja, M. L., Piñol, B. E. y Fernández-Argudín, B. M. (2016). Saltahojas (*Typhlocybae*) y su relación con los síntomas de enfermedades en un campo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de Protección Vegetal*, 31(3), 153-158.
- Sastry, K. S. (2013). Mechanism of seed transmission. In K. S. Sastry (Ed.), *Seed-borne plant virus diseases* (pp. 327). Springer Science & Business Media.
- Sharma, M., Sharma, A., & Gupta, S. K. (2020). Climate change and plant diseases. *Agricultural Research Journal*, 57(1), 1-6. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2020.00021.6>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2025a). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2025b). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/. Fecha de consulta: 2 de julio de 2025.
- Singhal, P., Nabi, S. U., Yadav, M. K., & Dubey, A. (2021). Mixed infection of plant viruses: Diagnostics, interactions and impact on host. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128(2), 353-368. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00384-0>
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 12(5), 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- SMN-CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional / Comisión Nacional del Agua. (2024). Reporte del Clima en México. Mayo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Mayo24.pdf>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2024.
- Soler-Garzón, A., McClean, P. E., & Miklas, P. N. (2021a). Genome-wide association mapping of *bc-1* and *bc-u* reveals candidate genes and new adjustments to the host-pathogen interaction for resis-

tance to bean common mosaic necrosis virus in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699569. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699569>

Soler-Garzón, A., McClean, P. E., & Miklas, P. N. (2021b). Coding mutations in vacuolar protein-sorting 4 AAA+ ATPase endosomal sorting complexes required for transport protein homologs underlie *bc-2* and new *bc-4* gene conferring resistance to bean common mosaic virus in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 12, 769247. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.769247>

Suárez, J. C., Polanía, J. A., Contreras, A. T., Rodríguez, L., Machado, L., Ordoñez, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2020). Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*, 216(2), 28. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-2565-4>

Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>

Tene, T. M., Sari, H., Canci, H., Maaruf, A., Eker, T., & Toker, C. (2023). Traits related to heat stress in *Phaseolus* species. *Agriculture*, 13(5), Article 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050953>

Tosquy-Valle, O. H., Ibarra-Pérez, F. J., Acosta-Gallegos, J. A., Esqueda-Esquivel, V. A. y Anaya-López, J. L. (2025). Rincón Grande: variedad de frijol negro para Veracruz y Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(3), e3646. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3646>

Trebicki, P. (2020). Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286, 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>

Tsai, W. A., Brosnan, C. A., Mitter, N., & Dietzgen, R. G. (2022). Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>

Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLoS One*, 16(4), Article e0249859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249859>

Verhoeven, A., Kloth, K. J., Kupczok, A., Oymans,

G. H., Damen, J., Rijnsburger, K., Jiang, Z., Deelen, C., Sasidharan, R., van-Zanten, M., & van-der-Vlugt, R. A. A. (2023). Arabidopsis latent virus 1, a comovirus widely spread in *Arabidopsis thaliana* collections. *New Phytologist*, 237, 1146-1153. <https://doi.org/10.1111/nph.18466>

Wang, L. & Ren, W. (2025). Drought in agriculture and climate-smart mitigation strategies. *Cell Reports Sustainability*, 2(6), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100386>

Weaver, M. L., Timm, H., Silbernagel, M. J., & Burke, D. W. (1985). Pollen staining and high-temperature tolerance of bean. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110(6), 797-799. <https://doi.org/10.21273/JASHS.110.6.797>

WMO, World Meteorological Organization (2024). Global Annual to Decadal Climate Update Target years: 2024 and 2024-2028. [En línea]. Disponible en: <https://library.wmo.int/records/item/68910wmo-global-annual-to-decadal-climate-update>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2024.