

CEPAS DE *Streptomyces* spp. PROMOTORAS DE CRECIMIENTO: INTERACCIÓN DIFERENCIAL CON VARIEDADES DE FRIJOL BAJO CONDICIONES DE CAMPO

GROWTH-PROMOTING *Streptomyces* spp. STRAINS: A DIFFERENTIAL INTERACTION WITH VARIETIES OF COMMON BEAN UNDER FIELD CONDITIONS

Bertha María Sánchez García^{1a}, Alfredo Josué Gámez Vázquez^{1b}, Juan José García Rodríguez^{1c},
Emiliano Villordo Pineda^{1d} y María Alejandra Mora Avilés^{1e*}

^{1a} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, C. P. 38110, Guanajuato, México
<https://orcid.org/0009-0000-4714-5723>

^{1b} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, C. P. 38110, Guanajuato, México
<https://orcid.org/0000-0002-2453-0570>

^{1c} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, C. P. 38110, Guanajuato, México
<https://orcid.org/0009-0005-2718-3059>

^{1d} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, C. P. 38110, Guanajuato, México
<https://orcid.org/0000-0003-4891-6520>

^{1e} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, C. P. 38110, Guanajuato, México
<https://orcid.org/0000-0001-7153-6214>

* Autor para correspondencia mora_alejandra@yahoo.com

RESUMEN

La producción de frijol se ve expuesta a condiciones adversas que merman la producción y el rendimiento, como plagas y enfermedades, condiciones climáticas y el incremento en el uso y el costo de insumos agrícolas. Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal han demostrado favorecer la producción de cultivos. *Streptomyces lasiicapitis* (B22) y *S. neyagawaensis* (B31) son dos cepas con características antagónicas y de promoción de crecimiento vegetal. El objetivo de esta investigación fue caracterizar la inducción de incremento de biomasa y rendimiento en plantas de frijol negro, variedades Verdín y Jamapa, a través de la aplicación de las cepas B22 y B31 en condiciones de campo. El análisis de la interacción reveló que, con respecto al control, el cultivar Verdín mostró interacciones positivas para ambas cepas, con incrementos significativos en peso seco de la planta (103% con ambas cepas); número de vainas (131% con B22 y 141% con B31); semillas por planta (132% con ambas cepas); y peso de semilla por planta (137% con ambas cepas), mientras que la variable peso de 100 semillas mostró un aumento reducido de 13% con B31. El cultivar Jamapa mostró una respuesta diferencial, destacando una interacción positiva con B31, con incrementos menores en el peso de semilla por planta y altura de planta de 23,5% y 16,6%, respectivamente. Estos resultados indican que hay una promoción de crecimiento y rendimiento, aunque con una respuesta diferencial entre cultivares, especialmente en aquellas asociadas con la biomasa de la planta.

Palabras clave: Actinobacterias, inducción de crecimiento, *Phaseolus vulgaris* L., biomasa.

ABSTRACT

Common bean production faces adverse conditions, such as pests and diseases, climatic factors, and increased use and cost of agricultural inputs, which reduce both yield and productivity. Plant growth-promoting bacteria have been shown to enhance crop production. *Streptomyces lasiicapitis* (B22) and *S. neyagawaensis* (B31) are two strains with antagonistic and plant growth-promoting characteristics. The objective of this study was to characterize the induction of increased biomass and yield in two black bean cultivars, Verdín and Jamapa, through the application of strains B22 and B31 under field conditions. The interaction analysis revealed that, with respect to the control, Verdín showed positive interactions with both strains, with significant increases in plant dry weight (103% with both strains); number of pods (131% with B22, and 141% with B31), seeds per plant (132% with both strains), and seed weight per plant (137% with both strains), while weight of 100 seeds showed a modest increase of 13% with B31. Jamapa cultivar exhibited a differential response, with a notable positive interaction with B31, resulting in increases in seed weight per plant and plant height of 23,5% and 16,6%, respectively. These results indicate that there was a significant promotion of growth and yield, although with a differential response between cultivars, especially in those related to plant biomass.

Keywords: Actinobacteria, growth induction, *Phaseolus vulgaris* L., biomass.

INTRODUCCIÓN

El frijol negro se cultiva en zonas tropicales de todo el mundo particularmente en India, Estados Unidos, Myanmar, Brasil, México, Tanzania y China. La producción de frijol se ve limitada por factores como la sequía (Jiménez-Galindo et al., 2018; Báez-González et al., 2020) y diversas enfermedades. Entre las enfermedades más importantes que reducen el rendimiento del grano se incluyen pudriciones de raíz (causadas por *Fusarium oxysporum* y *Rhizoctonia solani*), antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*), roya (*Uromyces appendiculatus*), tizón común bacteriano (*Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli*), y enfermedades virales como el Virus del Mosaico Común (BCMV) y Virus del Mosaico Amarillo Dorado (BGYMV) (Padilla-Ramírez et al., 2018; Aguilar et al., 2019; Morales-Soto y Lamz-Piedra, 2020).

Las variedades de frijol negro se consumen ampliamente en Latinoamérica donde se cultivan principalmente en condiciones de humedad residual y temporal, lo que resulta en limitaciones por escenarios de sequía y presencia de patógenos, impidiendo que alcance su potencial productivo. Para obtener mayor biomasa y rendimiento en el cultivo, se añaden fertilizantes fosfatados, para incrementar el número y peso de nódulos y la materia seca; asimismo, se realiza un manejo eficiente de nitrógeno para optimizar la nutrición y el rendimiento (Samago et al., 2018). Adicionalmente, la inoculación con rhizobia ha demostrado el incremento significativo de crecimiento de las plantas, su desempeño simbiótico y el rendimiento de grano de frijol, complementando con la selección de genotipos

con tolerancia a estrés hídrico y a enfermedades (Assefa et al., 2015; Samago et al., 2018).

Uno de los principales mecanismos de *Streptomyces* spp. para la promoción de crecimiento es la síntesis de ácido indol acético (AIA), una hormona vegetal crucial que regula varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas (Devi et al., 2022). Estudios previos han mostrado que diversas cepas de *Streptomyces*, como *Streptomyces fradiae* NKZ-259, pueden producir AIA en cantidades significativas, lo que incrementa la formación de raíces y la biomasa en plantas como frijol mungo y soya (Hata et al., 2021; Myo et al., 2019). Además de la producción de AIA, las especies de *Streptomyces* son conocidas por su capacidad para secretar sideróforos, compuestos quelantes de hierro que lo hacen más disponible para las plantas. Esto es particularmente benéfico en suelos deficientes de hierro, donde la competencia entre plantas y patógenos por el hierro puede reducir el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, Zhang et al. (2022) demostraron que cepas de *Streptomyces* pueden secretar sideróforos, que no solamente incrementan el crecimiento de plántulas de frijol mungo, sino que también inhiben el desarrollo de hongos patógenos. Este papel dual convierte a *Streptomyces* una opción atractiva para una agricultura sostenible.

Además, las *Streptomyces* pueden aumentar la solubilidad de fosfatos y, con ello, la capacidad de adquisición por las plantas (Pérez-Corral et al., 2022; Chaiharn et al., 2020). Esta solubilización de nutrientes combinada con la producción de hormonas de crecimiento y agentes de biocontrol, posiciona a las *Streptomyces* como una herramienta multifacética para mejorar el

rendimiento de cultivos.

Algunos antecedentes indican que *Streptomyces* spp. puede ser usada en la producción de frijol para mejorar el crecimiento y rendimiento de la planta. *Streptomyces recifensis* var. *lyticus* P3X ha mostrado estimular el crecimiento de plantas de frijol, resultando en un incremento de los índices morfo-bioquímicos, así como el rendimiento (Zhernosekova, 2012). Además, aislados de *Streptomyces* spp. han sido reportados por tener propiedades de promoción de crecimiento de plantas y pueden efectivamente promover el crecimiento de plantas de frijol tipo mungo (*Vigna mungo*) tanto en suelos estériles como no estériles (Nonthakaew et al., 2022).

Streptomyces lasiicarpitis y *S. neyagawaensis* son dos especies que han sido empleadas para el control de microorganismos en cultivo de ajo (*Sclerotium rolfsii* y *R. solani*) y chile (*F. oxysporum* y *P. capsici*) (Sánchez-García et al., 2022). Sin embargo, su capacidad como inductores de desarrollo y promotores de crecimiento para acumulación de biomasa está aún por demostrarse, y en particular en cultivos económicamente importantes como el frijol negro. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la inducción de incremento de biomasa y rendimiento en plantas de frijol negro variedades Verdín y Jamapa, a través de la aplicación de *S. lasiicarpitis* B22 y *S. neyagawaensis* B31 en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El bioensayo se realizó en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en Celaya, Guanajuato, México, en las coordenadas geográficas 20° 32' 05" N y 100° 48' 49" W, a 1750 msnm, durante la temporada primavera-verano, en condiciones de campo y temperatura media de 29,4 °C.

Material experimental

Los tratamientos consistieron en la aplicación de promotores de crecimiento de la especie *Streptomyces*: *S. lasiicarpitis* (B22) (número de acceso de Genbank: ON361556) o *S. neyagawaensis* (B31) (número de acceso de Genbank: OL619256).

Por su parte, el material vegetal consistió de dos cultivares de frijol negro. Verdín proviene de una crusa triple realizada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), que fue incorporada a México en el 2009. Las plantas de la variedad Verdín son de hábito de crecimiento indeterminado, arbustivas y erectas tipo II, con guías medianas y una altura del

dosel de alrededor de 59 cm. Sus flores son de color violeta, vainas amarillas en la madurez fisiológica. Su característica más sobresaliente es su precocidad; su floración ocurre entre los 34 y 37 días y llega a la madurez fisiológica entre los 67 y 70 días (Tosquy et al., 2016). Además, la variedad Jamapa, desarrollada en 1958 (López et al., 2007), se originó por múltiples cruzas de 15 líneas, de la colección Veracruz 87 (Voysest, 2000); es una variedad con plantas de mata baja, semi arbustivas (tipo arbolito), ramas erectas, con hoja triangular a circular, vainas color verde medio intenso, flores violetas y con una maduración fisiológica entre 82 y 83 días (Cárdenas y Velo, 1964). Jamapa muestra resistencia a la enfermedad del virus del mosaico dorado y a la roya (Voysest, 2000).

La aplicación de *Streptomyces* se realizó cada dos semanas en plantas de frijol sembradas en condiciones de campo y temporal (primavera - verano, 2023), vía drench (utilizando una mochila eléctrica de aspersión), a partir de los 40 días después de la siembra (fase vegetativa V4), en un total de cuatro aplicaciones hasta que el cultivo alcanzó la etapa de llenado de vaina. La concentración del inóculo fue de 1×10^8 UFC (Unidades Formadoras de Colonia) mL⁻¹ y un volumen de 30 mL planta⁻¹.

Las parcelas experimentales por tratamiento consistieron cada una de 12 surcos de 30 m de longitud, con una distancia entre surcos de 0,75 m y entre plantas de 0,10 m. El tratamiento testigo consistió de aplicación de agua en el mismo volumen que los tratamientos con *Streptomyces* spp., y estuvo representado por 3 surcos de 30 m.

Una vez alcanzada la madurez fisiológica del cultivo, se realizó la colecta de la parcela útil para la cuantificación de las variables. La parcela útil de cosecha consistió de tres surcos de 3 m lineales, en tres repeticiones para cada variedad por tratamiento y testigo.

Variables de inducción de crecimiento

La cosecha se realizó cuando las plantas de frijol se encontraban en madurez fisiológica. Se registraron los valores cuantitativos de las variables agronómicas siguientes: peso seco de la planta (biomasa total), número de vainas por planta, número de semillas por planta, peso de semillas por planta, peso de cien semillas, altura de planta, longitud de raíz y rendimiento. El tamaño de muestra dentro de la parcela útil fue de cinco plantas por surco, cada surco en tres repeticiones por variedad y tratamiento.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció en un diseño de bloques completamente al azar con arreglo en parcelas divididas, donde las parcelas grandes

fueron las variedades de frijol Jamapa y Verdín; y las parcelas chicas fueron las cepas B22 y B31 de *Streptomyces* spp. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un ANOVA y comparación de medias (Tukey $P \leq 0,05$). Se realizó un análisis de componentes principales por tratamiento, para identificar las variables de mayor importancia y patrones de respuesta entre genotipos y un análisis por factores con rutinas del programa SAS 9.4 (SAS Institute). El análisis de interacción se implementó según McDermott y Coe (2012) donde el origen del plano cartesiano corresponde a la media estandarizada de cada cultivar y los ejes de abscisas y ordenadas a las variables de estudio de las cepas de *Streptomyces* spp. estudiadas, respectivamente. El plano cartesiano muestra los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza de genotipos y tratamientos

Entre los factores de estudio y con base en la magnitud de los cuadrados medios, los genotipos generaron la mayor variabilidad en todas las variables evaluadas, con excepción del número de vainas, número de semillas y peso seco (Tabla 1). En segundo término, la interacción Genotipos \times Tratamientos, no obstante que la variabilidad generada fue menor con respecto a la de los genotipos, con excepción en la producción de biomasa total, se presentaron diferencias estadísticas significativas con $P \leq 0,01$, en todas las variables, con excepción en la longitud de raíz, donde fue más importante la variación generada por los genotipos, que en este caso fue con $P \leq 0,05$. En la expresión del número de vainas,

también se observaron diferencias significativas entre tratamientos y cuya variabilidad fue similar a la originada por el efecto de la interacción Genotipos \times Tratamientos.

Pruebas de rango múltiple de medias de variedades y tratamientos

La variedad Jamapa destacó por su rendimiento, al superar ($P \leq 0,05$) en rendimiento a Verdín con 7,44 g planta⁻¹, con base en su mayor peso de semilla; además de acumular la mayor cantidad de biomasa total, basándose en una mayor altura de planta (Tabla 2). Por su parte, la prueba de rango múltiple de tratamientos indicó que ambas cepas de *Streptomyces* spp. B31 y B22, superaron al testigo en rendimiento con 65,5 y 55,5%, y en número de vainas con 18 y 23%, respectivamente (Tabla 3).

Biomasa y crecimiento

La respuesta de la variedad Verdín a la aplicación de *Streptomyces* spp. resultó en incrementos significativos para ambas cepas, con respecto al testigo, en las variables peso seco de la planta (103% con ambas cepas); número de vainas por planta (131% (B22) y 141% (B31)); número de semillas por planta (132% con ambas cepas); peso de semilla por planta (137% en ambas cepas); la variable peso de 100 semillas mostró un incremento más modesto en una cepa (13% (B31)). Las variables que no mostraron diferencias con la aplicación de las dos cepas de *Streptomyces* spp. fueron altura de planta y longitud de raíz (Tabla 4). Los valores de la mayoría de los componentes de biomasa no mostraron diferencias estadísticas significativas entre especies de *Streptomyces* spp., ambas cepas incrementaron los valores en

Tabla 1. Análisis de varianza de genotipos y tratamientos de un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas (Steel y Torrie, 1980).

Table 1. Analysis of variance of genotypes and treatments from a randomized complete block design with a split-plot arrangement (Steel and Torrie, 1980).

Fuentes de Variación	Grados libertad	Cuadrados medios					
		Altura de planta	Longitud raíz	Número vainas	Número semillas	Peso semilla	Peso seco
Tratamientos	2	374,37	1,05	4,29*	12,90	5,54	5,95
Bloques	2	72,75	0,88	0,10	2,31	1,11	0,04
Bloques/Tratamientos	4	111,01	1,15	0,39	6,34	1,36	1,43
Genotipos (Gen)	1	8379,13**	7,51**	1,50	1,95	9,90**	3,44*
Genotipos *Tratamientos	2	405,43**	1,16*	4,38**	25,65**	2,98**	4,84**
Residual	257	47,62	0,26	0,43	2,76	0,49	0,78
Coeficiente variación de Gen (%)		14,7	11,8	13,7	15,7	13,3	13,2
							20,2

* $P \leq 0,05$; **, $P \leq 0,01$.

Tabla 2. Prueba de rango múltiple de medias de dos variedades de frijol con *Streptomyces* spp.
Table 2. Multiple range test of means of two common bean varieties with *Streptomyces* spp.

Genotipos	Altura de planta (cm)	Longitud de raíz (cm)	Peso de semilla (g)	Biomasa total (g)	Rendimiento (g planta ⁻¹)
Jamapa	52,26 a*	16,50 b	28,34 a	44,16 a	24,96 a
Verdín	41,10 b	19,76 a	23,17 b	40,55 b	17,53 b

*Valores promedio en la misma columna seguidos de letras similares no son significativamente diferentes de acuerdo al rango de prueba múltiple de Tukey $\alpha=0,05$.

Tabla 3. Prueba de rango múltiple de medias de tratamientos con dos cepas de *Streptomyces* spp.
Table 3. Multiple range test of means of treatments with two *Streptomyces* spp. strains.

Tratamientos	Número vainas	Rendimiento (g planta ⁻¹)
B22	24,01 a*	23,63 a
B31	22,98 ab	25,14 a
Testigo	19,45 b	15,19 b

*Valores promedio en la misma columna seguidos de letras similares no son significativamente diferentes de acuerdo al rango de prueba múltiple de Tukey $\alpha=0,05$.

la misma proporción, con respecto a las plantas testigo. Incremento de valores en variables de rendimiento fue reportado por Ghanem et al. (2022) al realizar aplicaciones de la mezcla de *S. sampsonii* (DG1) + *S. rochei* DG4 + *S. griseus* (DG5) en frijol cv. Paulista; reportando aumento de materia seca de plantas (67,33%) y en número de vainas por planta (18,67%) con respecto al testigo. Por su parte, El-Shatory et al. (2020), reportaron que la aplicación de metabolitos de *Streptomyces* sp. MG788012 en haba influyó positivamente en: longitud de tallo (111,6 cm), longitud de raíz (12,2 cm), número de vainas por planta (3,8) y peso seco de planta (18,9 g) comparado con el testigo.

Pérez-Corral et al. (2022) mencionan que *Streptomyces* spp. tiene la capacidad de producir compuestos no volátiles como el ácido indol-3-acético, sideróforos y ácido giberélico, que promueven el crecimiento de plantas. Estas hormonas, son probablemente inducidas, no solo en presencia de patógenos, sino también durante la interacción con rizobacterias benéficas como *Streptomyces* spp., lo anterior permite deducir que el incremento de valores de biomasa para la variedad Verdín, tiene sus orígenes en la producción de hormonas y su efecto en la planta. Esto es similar a lo reportado por Korayem et al. (2020), quienes indican que la aplicación de

esporas de *S. parvulus* cepa 10d a frijol variedad Valentino, incrementó la altura de planta 41,5 cm (18,8%), hojas por planta 20 (42,8%), vainas por planta 15 (25%) y materia seca 10 g planta⁻¹ (150%) con respecto al testigo; así como Ray y Chakraborty (2021), quienes reportaron que la aplicación de *S. griseus*, *S. tricolor* y *S. flavogriseus* a frijol cv. Jwala y Kholar mostraron diferencias significativas con el testigo en longitud de tallo (22-65%), longitud de raíz (36-130%), número de hojas (18-70%) y peso seco de planta (20-37%).

En este estudio, el cultivar Jamapa no mostró diferencias estadísticas significativas para la mayoría de las variables evaluadas. Se observó que las variables que tuvieron un incremento por la aplicación de *Streptomyces* spp. fueron peso seco de la planta (14% (B31)); peso de semilla por planta (23,5% (B31)), y altura de planta (12,2% (B22) y 16,6% (B31)), con respecto al testigo (Tabla 4). Similar a estos resultados, Worsley et al. (2020) afirmaron que la aplicación de la mezcla de esporas de *Streptomyces* spp. cepas L2, M2 y M3 incrementaron el peso seco de plantas de *Arabidopsis thaliana* de un promedio de $12,69 \pm 1,94$ mg (testigo) a $39,29 \pm 4,39$ mg (inoculadas).

El origen de las variedades de frijol pudiera dar indicios de la diferencia de respuesta; por un

Tabla 4. Biomasa y rendimiento de frijol de los cultivares Verdín y Jamapa, inoculados con *Streptomyces* spp. (B22 y B31)
Table 4. Biomass and yield traits in Verdín and Jamapa bean cultivars inoculated with *Streptomyces* spp. (B22 and B31).

Variable	Tratamiento					Testigo
	B22	B31	Verdín	B22	Jamapa B31	
Altura de planta (cm)	42,6 ± 0,37c*	39,8 ± 0,57c	40,8 ± 1,77c	53,6 ± 0,94a	55,8 ± 1,56a	47,8 ± 1,49b
Longitud de raíz (cm)	24,6 ± 1,33a	23,7 ± 0,24a	22 ± 2,78a	15,1 ± 1,56b	16,4 ± 1,72b	17 ± 0,22b
Núm de vainas por planta	36,1 ± 1,41a	37,6 ± 2,51a	15,6 ± 1,99c	22,5 ± 1,37b	23,9 ± 0,86b	24,2 ± 2,19b
Núm de semillas por planta	156,3 ± 8,59a	156,7 ± 10,6a	67,2 ± 8,44c	105 ± 7,2b	113,2 ± 3,49b	108,2 ± 8,93b
Peso seco de la planta (g)	46,8 ± 2,93a	45,7 ± 4,16a	22,7 ± 1,98c	42,3 ± 1,89b	47,2 ± 2,32a	41,9 ± 2,98b
Peso de semilla por planta (g)	23,8 ± 1,8b	23,3 ± 2,6b	10 ± 1,3c	25,3 ± 1,2b	28,9 ± 1,6a	23,5 ± 1,5b
Peso de 100 semillas (g)	24,69 ± 0,22b	25,47 ± 0,14b	22,46 ± 0,23c	24,85 ± 0,89b	26,62 ± 0,48a	26,0 ± 0,16ab
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	2964,5 ± 158a	2970,8 ± 129a	1274,1 ± 127c	1611 ± 52b	1736 ± 108b	1660 ± 134b

* Valores promedio en la misma fila seguidas de letras similares no son significativamente diferentes de acuerdo al rango de prueba múltiple de Tukey $\alpha=0,05$.

lado, el cultivar Verdín proviene de una crusa triple (Tosquy et al., 2016), lo que la coloca en una condición de menor variabilidad, haciendo que la respuesta de las variables evaluadas a la aplicación de *Streptomyces* spp. sea evidente. Por su parte, la variedad Jamapa proviene de la crusa de 15 líneas individuales (Cárdenas y Velo, 1964), posiblemente con mayor heterocigosis, y por tanto con mayor plasticidad para normalizar las interacciones ambientales, lo que pudiera hacer que los efectos de *Streptomyces* spp. no sean detectables para la mayoría de las variables

estudiadas.

Las diferencias entre variedades también fueron reportadas por Akbari et al. (2020) quienes indican que la variedad Gonbad de trigo incrementó su biomasa (63%), mientras que Zarin no mostró ningún efecto tras ser inoculadas con *Streptomyces* sp. C-2012. Esta cepa de *Streptomyces* generalmente mejora los efectos negativos al estrés salino incrementando la clorofila, carotenoides y reduciendo el contenido de sodio, ascorbato peroxidasa (APX) y superóxido dismutasa (SOD) en ambos cultivares; sin

embargo, su efecto en la biomasa fue diferente bajo condiciones normales (sin estrés); sugiriendo que Gonbad puede reconocer a la cepa C-2012 como un inductor de estrés sutil y no como una promotora de crecimiento. Lo anterior establece que las respuestas fisiológicas, fenotípicas y moleculares pudieran también ser diferentes entre genotipos de frijol.

La ausencia de efecto por *Streptomyces* spp. en variables como altura de planta para el caso de Verdín y, por otro lado, número de vainas por planta, número de semillas por planta y peso de cien semillas para el caso de Jamapa; o longitud de raíz en Verdín y Jamapa, coincide con los resultados de Jarak et al. (2012), quienes reportaron que la presencia de *Streptomyces* sp. junto a otros microorganismos (*Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli* y *Azotobacter chroococcum*) en plantas de frijol, no tuvo efecto en la altura de planta, longitud de raíz y el número de vainas por planta, pero si tuvo un efecto significativo en peso de semilla por planta.

Finalmente, en el análisis de rendimiento se observó un incremento por la aplicación de ambas cepas de *Streptomyces* spp. en el cultivar Verdín, en hasta 2,3 veces, en comparación con el testigo (Tabla 4). Por su parte, la variedad Jamapa no mostró diferencias significativas en rendimiento por aplicación de *Streptomyces* spp. con respecto al testigo y se encuentra dentro del rango reportado por López et al. (2007), similar a las variables número de vainas por planta y número de semillas por planta.

Interacción entre cepas de *Streptomyces* y cultivares de frijol

De acuerdo con el análisis de interacción de los componentes para cada una de las variables, se observó que el tratamiento B22 aplicado al cultivar Verdín fue el que mostró los valores mayores para las variables peso seco (Fig. 1A), número de vainas por planta (Fig. 1B), número de semillas por planta (Fig. 1C) y peso de semilla por planta (Fig. 1D); por su parte, el tratamiento B31 mostró los valores mayores para el cultivar Verdín en las variables peso de cien semillas (Fig. 1E), altura de planta (Fig. 1F), longitud de raíz (Fig. 1G), y rendimiento (Fig. 1H). Lo anterior indica que el cultivar Verdín tuvo una interacción positiva con los tratamientos con *Streptomyces* spp., de manera que los valores para el tratamiento testigo fueron consistentemente bajos en todas las variables de biomasa y rendimiento.

Por otra parte, el cultivar Jamapa, mostró las mejores respuestas en interacción con B31 para las variables número de vainas por planta (Fig. 1B), peso de semilla por planta (Fig. 1D), y en coincidencia con el cultivar Verdín, para

las variables peso de cien semillas (Fig. 1E), altura de planta (Fig. 1F) y rendimiento (Fig. 1H). El cultivar Jamapa no mostró interacción positiva con ninguno de los valores de biomasa y rendimiento respecto del tratamiento B22; por el contrario, se observó que los valores más altos de las variables peso seco (Fig. 1A), número de semillas por planta (Fig. 1C) y longitud de raíz (Fig. 1G) se obtuvieron en el tratamiento testigo, evidenciando falta de respuesta a B22; sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre Jamapa testigo e inoculado con B22.

Lo anterior muestra que las interacciones entre los componentes en la expresión de las variables evaluadas variaron tanto dentro como entre genotipos en presencia de las dos cepas de *Streptomyces* spp. Destaca que el cultivar Verdín mostró mayor número de variables con interacción positiva en comparación con el cultivar Jamapa. Akbari et al. (2020) reportaron resultados similares en trigo donde las cepas *S. monomycini* cepa C 801 (Número de acceso GenBank: KX020407) y *S. rimosus* cepa C-2012 (Número de acceso GenBank: JX839830) tuvieron interacciones diferenciales en cultivares comerciales de trigo harinero Chamran2, Pishtaz, Zarin y Gonbad. En este sentido, mientras la cepa C 801 indujo el incremento de peso seco total en todos los cultivares de 17-42%; la cepa C-2012 solo incrementó el peso seco total del cultivar Gonbad en 49%. Ambas cepas incrementaron el peso seco de raíz de todos los cultivares en 26-60% y 63-85%, respectivamente.

Una razón por la que la inoculación de rhizobacteria como *Streptomyces* spp. derivan en un diferencial de respuesta en plantas, radica en el tipo de compuestos orgánicos que son producidos en sus raíces, conocidos como exudados en raíz, los cuales envían señales que atraen cepas específicas (interacción); por otra parte, la composición de los exudados radiculares define el tipo de rhizobacteria que tiene más probabilidad de colonizar una variedad de planta y la factibilidad de ello dependerá también de la disponibilidad de nutrientes y estrés en la planta (Tripathi et al., 2024). Así pues, la promoción de crecimiento ocurre a través de varios mecanismos incluyendo solubilización de nutrientes (e.g. fosfato) fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas y mecanismos antagónicos como biocontrol, todas características funcionales, aunque variables entre *Streptomyces* spp.

Componentes principales

El análisis de componentes principales mostró, por un lado, que en el componente principal 1 (CP1), las variables de mayor importancia

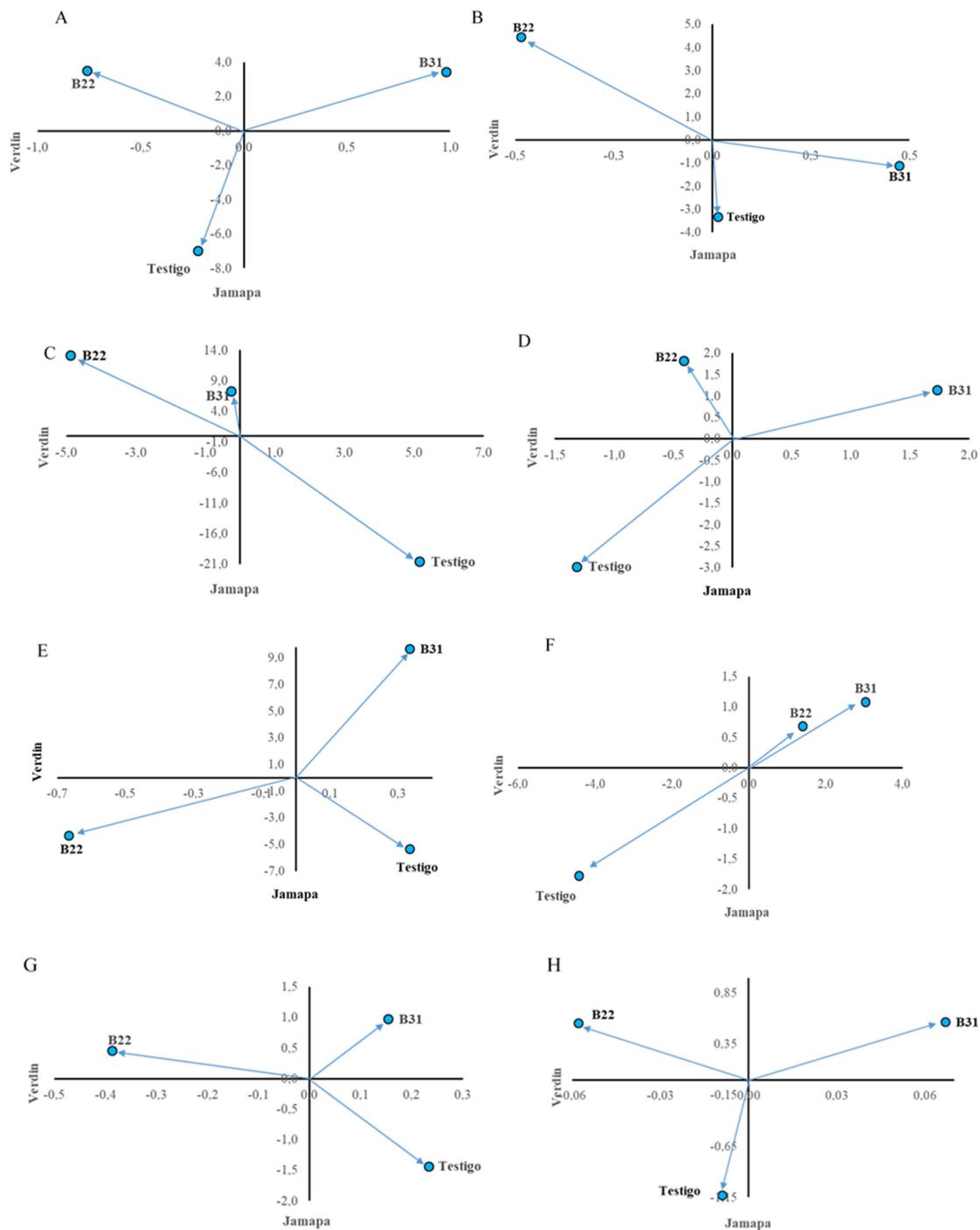


Fig. 1. Plano cartesiano de la interacción de cepas de *Streptomyces* spp. y cultivares de frijol Verdín y Jamapa, en la expresión de: A. peso seco de planta; B. número de vainas por planta; C. número de semillas por planta; D. peso de semillas por planta; E. peso de cien semillas por planta; F. altura de planta; G. longitud de raíz; y H. rendimiento.

Fig. 1. Cartesian plane of the interaction of *Streptomyces* spp. strains and Verdín and Jamapa bean cultivars in the expression of: A. plant dry weight; B. number of pods per plant; C. number of seeds per plant; D. weight of seeds per plant; E. weight of one hundred seeds per plant; F. plant height; G. root length; and H. yield.

fueron número de semillas por planta, peso seco de la planta (biomasa total), y número de vainas por planta. Este CP explicó el 51,4% de la variabilidad total (Tabla 5). La dispersión de los tratamientos con *Streptomyces* spp. aplicados a frijol Verdín, confirma la correspondencia entre las características morfológicas o de biomasa evaluadas con respecto a la aplicación de cada

cepa de *Streptomyces* spp., donde destaca B22 con una mayor influencia, seguida de B31 y en un plano opuesto, Verdín testigo con una menor expresión de las variables evaluadas (Fig. 2), destacando con ello el efecto en la presencia de *Streptomyces* spp. para incrementar las variables de biomasa del CP1 en Verdín. Por su parte, la variedad Jamapa, no mostró variación en las

Tabla 5. Valores y vectores propios de los dos primeros componentes principales (CP) de la descripción de dos especies de *Streptomyces* spp. en frijol Verdín y Jamapa, con base en seis variables morfológicas y de biomasa.

Table 5. Values and vectors of the first two principal components (PC) of two *Streptomyces* spp. in Verdín and Jamapa bean cultivars, based on six morphological and biomass variables.

Características evaluadas	CP1	CP2
Altura de planta	-0,123	0,594
Longitud de raíz	0,365	-0,371
Número de vainas por planta	0,440	0,013
Número de semillas por planta	0,501	0,085
Peso de semilla por planta	0,172	0,574
Peso seco de planta (biomasa)	0,467	-0,182
Peso cien semillas	0,343	0,355
Valor propio	4,114	3,203
Variación explicada, %	51,43	40,04
Variación acumulada, %	51,43	91,48

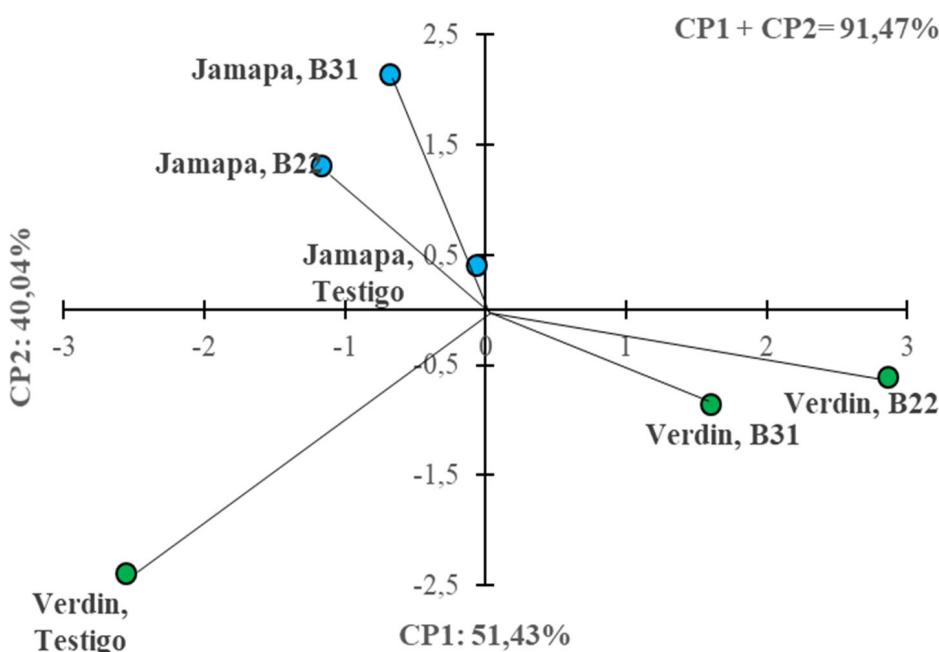


Fig. 2. Biplot del análisis de componentes principales (CP1 y CP2) para las variedades de frijol Verdín y Jamapa inoculadas con *Streptomyces* spp. (B22 y B31) y tratamiento testigo.

Fig. 2. Principal components analysis biplot (CP1 and CP2) for Verdín and Jamapa bean cultivars inoculated with *Streptomyces* spp. (B22 and B31) and the control.

variables asociadas al CP1 frente a la adición de cualquiera de las cepas de *Streptomyces* spp.

Las variables altura de planta, peso de semilla por planta, longitud de raíz y peso de cien semillas conformaron el componente principal 2 (CP2) y explicó el 40,04% de la variabilidad (Tabla 5). La dispersión de los tratamientos con *Streptomyces* spp. aplicados a frijol Jamapa muestra que el tratamiento B31 tuvo mayor influencia, seguido de B22; sin embargo, Jamapa testigo se encontró muy cerca del vértice del plano cartesiano donde confluyen Jamapa con ambas cepas, indicando muy poca variabilidad entre tratamientos y el testigo (Fig. 2) y una respuesta cercana al promedio general del experimento. Lo anterior coincide con los valores de rendimiento de frijol Jamapa, sugiriendo la ausencia de efecto por parte de *Streptomyces* spp. en variables asociadas a incremento de biomasa. Finalmente, la variedad Verdín no mostró variación importante en las

variables del CP2, confirmando el efecto principal de la adición de *Streptomyces* spp. en las variables del CP1.

En general, se observa que existieron dos patrones de respuesta muy diferentes en ambas variedades, ya que los puntos de dispersión tienen un ángulo mayor a 90°, lo que indica que el efecto de aplicar *Streptomyces* spp., depende también de la constitución genética de cada variedad. Se observó un mayor impacto en Verdín en contraste con Jamapa, que respondió a la aplicación de *Streptomyces* spp. mejorando su altura de planta y peso de semilla, pero con menores longitudes de raíz.

Factores subyacentes

En el plano cartesiano del análisis de factores (Fig. 3), se aprecian dos principales patrones de respuesta entre las variables evaluadas, el primer Factor Subyacente (FS1) explicó el 70,0% de la

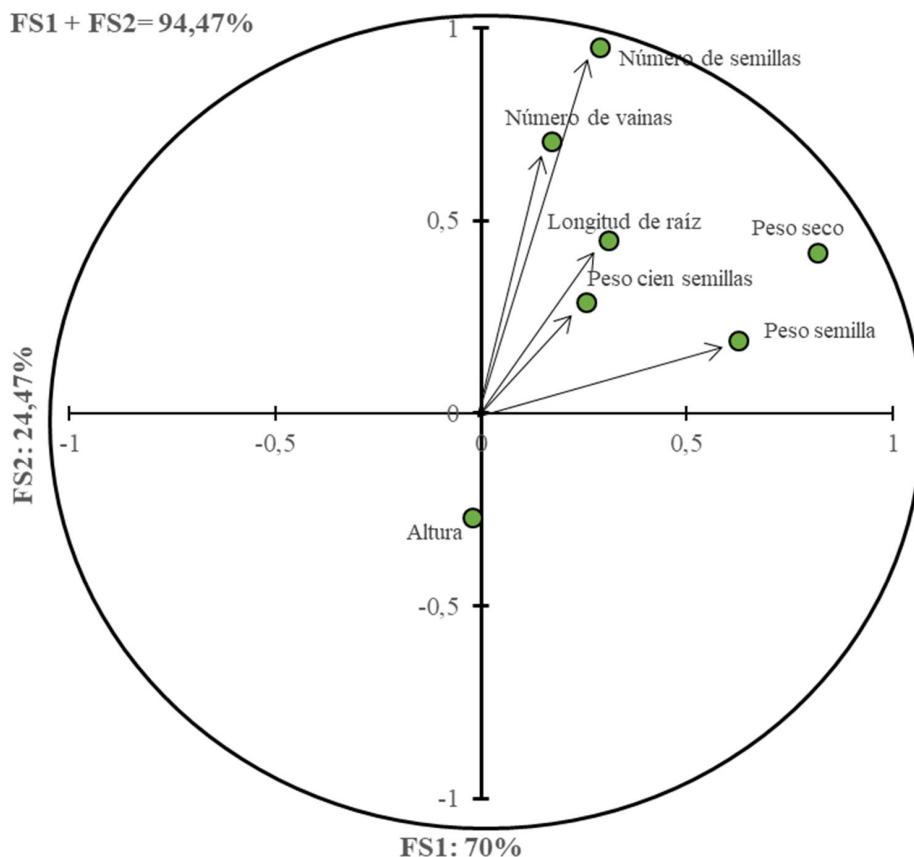


Fig. 3. Dispersión del análisis factorial de variables evaluadas en frijol Verdín y Jamapa, inoculados con *S. lasiicapitis* (B22) o *S. neyagawaensis* (B31).

Fig. 3. Factorial analysis dispersion of variables evaluated in Verdín and Jamapa bean cultivars inoculated with *S. lasiicapitis* (B22) or *S. neyagawaensis* (B31).

variabilidad y fue conformado por las variables peso seco (biomasa total) y peso de semilla por planta, con una estrecha interdependencia; el segundo FS2 explicó el 24,47%, y estuvo compuesto por las variables longitud de raíz, número de semillas por planta y número de vainas por planta (Fig. 3). Asimismo, consistente con la cuantificación de las variables peso de cien semillas y altura de planta, ambas muestran una baja variabilidad en el experimento, indicando que no son influenciadas de manera significativa, por la presencia de *Streptomyces* spp. Las razones por las cuales *Streptomyces* spp. típicamente conduce a un incremento de biomasa en lugar de sólo elongación, incluyen una serie de factores como producción de hormonas, mejora de la toma de nutrientes y biocontrol de patógenos. Estos mecanismos en conjunto incrementan el crecimiento y desarrollo de la planta, resultando en una planta más grande en lugar de más alta como *Salvia miltiorrhiza* inoculada con *S. albidoflavus* St-220 (Du et al., 2022) y con mejor calidad nutritiva, como es el caso de espinaca inoculada con *S. albogriseolus* y *S. kanamyceticus* en la que se determinó una menor concentración de nitrato y un incremento de contenido de proteína en presencia de nitrato de potasio (Saraylou et al., 2025).

CONCLUSIONES

El incremento en los valores de biomasa y rendimiento en plantas de frijol variedades Verdín y Jamapa, a través de la aplicación de *S. lasiicapitis* (B22) y *S. neyagawaensis* (B31), en condiciones de campo, indica que, no hay un efecto uniforme en las variables evaluadas dentro y entre de cada variedad.

Las variables de crecimiento indican que la biomasa mostró mayor incremento por efecto de la presencia de *Streptomyces* spp. que las variables de longitud (longitud de raíz y altura de planta). Se observó un diferencial de respuesta en las variedades de frijol evaluadas, lo que indica que el efecto de *Streptomyces* como PGPR, no es uniforme para los cultivares evaluados.

La identificación de las diferentes respuestas en las variedades de frijol proporciona información valiosa para incluir agentes promotores de crecimiento como *S. lasiicapitis* y *S. neyagawaensis* en acompañamiento de cultivares compatibles que respondan a las ventajas de incremento de biomasa y rendimiento.

Contribución de autores

Participación activa en la revisión bibliográfica: Bertha María Sánchez García, Alfredo Josué Gámez Vázquez y María Alejandra Mora Avilés

Participación activa en el desarrollo de la

metodología: Bertha María Sánchez García, Alfredo Josué Gámez Vázquez, Juan José García Rodríguez, Emiliiano Villordo Pineda y María Alejandra Mora Avilés

Participación en la discusión de los resultados: Bertha María Sánchez García, Alfredo Josué Gámez Vázquez y María Alejandra Mora Avilés

Revisión y aprobación de la versión final del artículo: Bertha María Sánchez García, Alfredo Josué Gámez Vázquez y María Alejandra Mora Avilés

LITERATURA CITADA

- Aguilar, R. J. O., M. G. Gallegos., C. F. D. Hernández., S. M. Cepeda., y D. Sánchez-Aspeytia. 2019. Incidencia y severidad del tizón común en plantas de frijol inoculados con *Rhizobium phaseoli*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10 (2): 325- 336. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1594>
- Akbari, A., S. Gharanjik., P. Koobaz., and A. Sadeghi. 2020. Plant growth promoting *Streptomyces* strains are selectively interacting with the wheat cultivars especially in saline conditions. Heliyon. 6(2):e03445. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03445>. Erratum in: Heliyon. Apr 10; 6(4):e03675. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03675>
- Assefa, T., J. Wu., S.E. Beebe., I.M. Rao., Marcomin., and J. C. Rubyogo. 2015. Improving adaptation to drought stress in small red common bean: phenotypic differences and predicted genotypic effects on grain yield, yield components and harvest index. Euphytica 203:477–489. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1242-x>
- Báez-González, A. D., R. Fajardo-Díaz., G. García-Romero., E. Osuna-Ceja., J. R. Kiniry., and M. N. Meki. 2020. High sowing densities in rainfed common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mexican semi-arid highlands under future climate change. Agronomy 3(10):442. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030442>
- Cárdenas, R. F., y F. G. Velo 1964. Jamapa, una variedad mejorada de frijol para el trópico. En: Reunión del Proyecto Cooperativo Centroamericano de Mejoramiento de Frijol, 3a., Antigua, Guatemala. 1964. Informe. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba, Costa Rica. Pub. Misc. No. 22. p. 35-38.
- Chaiharn, M., T. Theantana., and W. Pathomaree. 2020. Evaluation of biocontrol activities of *Streptomyces* spp. against rice blast disease fungi. Pathogens 9(2): 126. <https://doi.org/10.3390/pathogens9020126>

- Devi, S., M. Sharma., and R. K. Manhas. 2022. Investigating the plant growth promoting and biocontrol potentiality of endophytic *Streptomyces* sp. SP5 against early blight in *Solanum lycopersicum* seedlings. BMC Microbiology 22:285. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02695-8>
- Du, Y., T. Wang., J. Jiang., Y. Wang., C. Lv., K. Sun., J. Sun., B. Yan., C. Kang., L. Guo., and L. Huang. 2022. Biological control and plant growth promotion properties of *Streptomyces albidoflavus* St-220 isolated from *Salvia miltiorrhiza* rhizosphere. Frontiers in Plant Science 13:976813. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.976813>
- El-Shatoury, S. A., F. Ameen., H. Moussa., O. A. Wahid., A. Dewedar., and S. Al Nadhari. 2020. Biocontrol of chocolate spot disease (*Botrytis cinerea*) in faba bean using endophytic actinomycetes *Streptomyces*: a field study to compare application techniques. PeerJ 8:e8582 <http://doi.org/10.7717/peerj.8582>
- El-Tarabily, K. A., Nassar, A. H., Hardy, G. E. S. J., and Sivasithamparam, K. 2009. Plant growth-promotion and biological control of *Pythium aphanidermatum*, a pathogen of cucumber, by endophytic actinomycetes. Journal of Applied Microbiology 106(1): 13–26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03926.x>
- Ghanem, G. A. M., D. A. S. Gebily, M. M. Ragab, A. M. Ali., N. E. D. K. Soliman, and T. H. A. El-Moity. 2022. Efficacy of antifungal substances of three *Streptomyces* spp. against different plant pathogenic fungi. Egyptian Journal of Biological Pest Control. 32: 112. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00612-9>
- Hata, E., M. Yusof, and D. Zulperi. 2021. Induction of systemic resistance against bacterial leaf streak disease and growth promotion in rice plant by *Streptomyces shenzhenensis* tksc3 and *Streptomyces* sp. SS8. The Plant Pathology Journal 37(2): 173-181. <https://doi.org/10.5423/ppj.oa.05.2020.0083>
- Jarak, M., T. Jafari, S. Djuric, J. Varga., J. Cervenski, M. Vasic, and J. Colo. 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria in bean production. Acta Horticulturae 960: 409–415. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.960.58>
- Jiménez-Galindo, J. C., L. Álvarez-Iglesias, P. Revill, R. Jacinto-Soto, L. E. García-Domínguez, M. de La Fuente, R. A. Malvar-Pintos, B. Ordás-López, A. Jody Vander Wal, and J. M. Osorno. 2018. Screening for drought tolerance in tepary and common bean based on osmotic potential assays. Plant 2(6): 24. <https://doi.org/10.11648/j.plant.20180602.11>
- Korayem, A. S., A. A. A. Abdelhafez, M. M. Zaki, and E. A. Saleh. 2020. Biological control of green bean Damping-off disease caused by *Rhizoctonia solani* by *Streptomyces parvulus* strain 10d. Egyptian Journal of Microbiology 55(1): 87-94. <https://doi.org/10.21608/ejm.2020.22329.1145>
- López, S. E., Ó. H. Tosquy-Valle, B. Villar-Sánchez, J. Cumplán-Gutiérrez, F. J. Ugalde-Acosta, y E. N. Becerra-Leor. 2007. Negro Papaloapan, nuevo cultivar de frijol para las áreas tropicales de México. Agricultura Técnica en México, 33(3): 259-269. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60833210>
- McDermott, B., and Coe, R. 2012. An easy introduction to biplots for multi-environment trials. 62 p. University of Reading, Reading, UK, and World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenya.
- Morales-Soto, A. y Lamz-Piedra, A. 2020. Métodos de mejora genética en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) frente al virus del Mosaico Dorado Amarillo del Frijol (BGYMV). Cultivos tropicales 41(4) e10. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193266197010>
- Myo, E., B. Ge, J. Ma, H. Cui, B. Liu, L. Shi, M. Jiang, and K. Zhang. 2019. Indole-3-acetic acid production by *Streptomyces fradiae* nkz-259 and its formulation to enhance plant growth. BMC Microbiology 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1528-1>
- Nonthakaew, N., W. Panbangred, W. Songnuan, and B. Intra. 2022. Plant growth-promoting properties of *Streptomyces* spp. isolates and their impact on mung bean plantlets' rhizosphere microbiome. Frontiers of Microbiology 13:967415. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.967415>
- Padilla-Ramírez, J. S., R. Ochoa-Márquez, R. Rosales-Serna, F. J. Ibarra-Pérez, R. Méndez-Aguilar, S. Hernández-Delgado, J. L. Chávez-Servia, and N. Mayek-Pérez. 2018. Analysis of *Fusarium*-common beans pathosystem in Aguascalientes, Mexico. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72875>
- Pérez-Corral, D., J. Ornelas-Paz, G. Olivas, C. Acosta-Muñiz, M. Salas-Marina, D. Reyes, D. R. Sepúlveda, Y. Mares-Ponce de León, and C. Ríos-Velasco. 2022. Growth promotion of *Phaseolus vulgaris* and *Arabidopsis thaliana* seedlings by streptomycetes volatile compounds. Plants 11(7): 875. <https://doi.org/10.3390/plants11070875>

- Ray, P. and B. Chakraborty. 2021. Evaluation of *Streptomyces* spp. growth promotion in *Phaseolus vulgaris* and their application for induced resistance against *Fusarium solani*. Journal of Mycopathological Research 59(1): 67-74.
- Samago, T. Y. E.W. Anniye, and F. D. Dakora. 2018. Grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties is markedly increased by rhizobial inoculation and phosphorus application in Ethiopia. Symbiosis 75: 245-255. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0529-9>
- Sánchez-García B.M, J. G. Ramírez-Pimentel, R. Rodríguez-Guerra, L. P. Guevara-Acevedo, J. C. Raya-Pérez, J. Covarrubias-Prieto, and M. A. Mora-Avilés. 2022. Molecular identification and antagonistic potential of three strains of *Streptomyces* against phytopathogenic fungi. Agrociencia 56(5): 1018-1043. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i5.2793>
- Saraylou, M. H. N. Ghomsheh, N. Enayatizamir, N. Rangzan, and S. Senn. 2025. Impact of *Streptomyces* inoculation and nitrogen fertilizers on spinach (*Spinacia oleracea* L.): biomass, nitrate and nutrient concentration. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1–10. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2526786>
- Steel R. G. D, and J. H. Torrie. 1980 Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Tosquy, V. O. H, E. López-Salinas, B. Villar-Sánchez, J. A. Acosta-Gallegos y J. R. Rodríguez-Rodríguez. 2016. Verdín: variedad de frijol negro tolerante a sequía terminal para Veracruz y Chiapas, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 7(7): 1775-1780. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.170>.
- Tripathi, A, V. Kumar, P. Divya, J. Gurmeet, S. Navjot, S. Brar, A. Taufeeq, I. Pandey, K. K. Dash, A. V. Samrot, S. Rustagi. 2024. An updated review on significance of PGPR-induced plant signaling and stress management in advancing sustainable agriculture. Journal of Agriculture and Food Research 16: 101169. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101169>
- Voysest, O. 2000. Mejoramiento genético del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): legado de variedades de América Latina 1930-1999 (No. 321). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) 195 p ISBN 958-694-032-2.
- Worsley, S. F, J. Newitt, J. Rassbach, S. F. D. Batey, N. A. Holmes, J. C. Murrell, B. Wilkinson, and M. I. Hutchings. 2020. *Streptomyces* endophytes promote host health and enhance growth across plant species. Applied and Environmental Microbiology 86:e01053-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.01053-20>.
- Zhang, H, X. Bai, Y. Han, and L. Han. 2022. Isolation, identification, and growth-promotion function of *Streptomyces* sp. in wetland rhizosphere. Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2112434/v1>
- Zhernosekova, I. V. 2012. Physiological activity of streptomycetes and commercial biopreparations of haricot bean (*Phaseolus vulgaris*). Regulatory Mechanisms in Biosystems. 3(2): 32-36. <https://doi.org/10.15421/021229>

