

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
PROGRAMA DOCENTE DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA



Efecto de postbióticos de bacterias ácido-lácticas sobre la germinación del frijol comba
(*Phaseolus lunatus* L.) de la región de Tierra Caliente, Guerrero

Por:

ARNOLDO BELTRÁN MATA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
PROGRAMA DOCENTE DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Efecto de postbióticos de bacterias ácido-lácticas sobre la germinación del frijol comba
(*Phaseolus lunatus* L.) de la región de Tierra Caliente, Guerrero

Por: Arnoldo Beltrán Mata

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Comité de asesoría



Dr. Julio César Tafolla Arellano
Asesor Principal Interno



Dra. Cecilia Castro López
Asesora Principal Externa



Dra. Silvia Patricia Acuña Álvarez
Coasesora



Dr. Guillermo C. G. Martínez Ávila
Coasesor Externo

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

PROGRAMA DOCENTE DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Efecto de postbióticos de bacterias ácido-lácticas sobre la germinación del frijol comba
(*Phaseolus lunatus* L.) de la región de Tierra Caliente, Guerrero

Por: Arnoldo Beltrán Mata

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Jurado examinador


Dr. Julio César Tafolla Arellano
Asesor Principal Interno


Dra. Cécilia Castro López
Asesora Principal Externa


Dra. Silvia Patricia Acuña Álvarez
Coasesora


Dr. Guillermo C. G. Martínez Ávila
Coasesor Externo




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

A t e n t a m e n t e

Alma Terra Matter



Arnoldo Beltrán Mata

Autor principal

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a **Dios**, por permitirme la dicha de haber estudiado una gran carrera profesional. Por cada oportunidad, etapa vivida y cada puerta abierta para que fuera posible este proyecto en un tiempo perfecto. Por poner a cada persona correcta que cruzó en mi camino, me instruyó y brindó su apoyo.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi gran *Alma Terra Mater* por brindarme la experiencia de formar parte de la familia Buitre y por cada profesional con el deseo de seguir creciendo, formar y compartir sus conocimientos.

Agradezco al **Dr. Julio César Tafolla Arellano**, por darme la oportunidad y confianza de participar en este proyecto. Por tomarme en cuenta para pertenecer a su gran equipo de trabajo en mi estancia del desarrollo de esta tesis.

De manera muy especial a mi asesora la **Dra. Cecilia Castro López**, por estar para mí en todo momento y brindarme apoyo incondicional, enseñanza, guía y sobre todo, paciencia. Por sus conocimientos compartidos, experiencias y palabras de ánimo. Por ser un gran ejemplo admirable y profesional en el ámbito científico, gracias.

Gracias al **Laboratorio de Biotecnología y Biología Molecular** y su equipo de trabajo, por brindarme las instalaciones, mostrar su apoyo, compartir experiencias y enseñanzas.

Agradezco de manera especial al **M.C. Luis Jesús Lozano** y su familia, por el apoyo que de manera incondicional me brindaron y su cariño. Por proporcionarme un espacio y sus mensajes de ánimo, el ser ejemplo, formar parte de esta gran etapa y mostrarme un camino digno de admirar.

Gracias a mi **familia y amigos en la fe**, quienes siempre me han impulsado, han creído en mí y me han apoyado en este camino.

Infinitas gracias a mis grandes **amigos**: Juan Carlos Hernández, Sergio Gonzáles, Alfredo Chávez, Johana Bastidos, Ángel Argüello, María José Espinosa, Abigail Castañeda y Jaqueline Bravo. Quienes se convirtieron en personas inolvidables, por cada momento compartido que se convirtió en un grato recuerdo y grandes experiencias. Por ser la definición completa de amistad, por cada mensaje de ánimo, cada desvelo, cada festejo, cada sonrisa compartida y cada momento que quedará marcado en mi corazón, gracias por caminar juntos hacia el éxito.

DEDICATORIA

A Dios, mis padres y hermana.

Agradezco enormemente el cariño, atención y confianza que emplearon en mí para la culminación de esta etapa, por su esfuerzo para que yo pudiera lograr el sueño que ambos compartimos.

A mi padre **Arnoldo Eleazar Beltrán Cervantes**, por su mano firme que me sostuvo, me guió en cada decisión y me brindó sus palabras de apoyo para lograr mi meta. Por sus consejos llenos de sabiduría, por creer en mí y asegurarse que nunca dejara mis sueños.

A mi madre **María Elvira Mata del Bosque**, por su amor incomparable, por cada abrazo, cada oración y cada palabra de ánimo para no rendirme. Por su palabra suave llena de cariño, acompañarme con su paciencia, bondad y estar conmigo en todo momento.

A mi hermana **Cristelly Judith Beltrán Mata**, por acompañarme siempre, ser ese gran ejemplo de profesionalismo, constancia y de siempre perseguir sus sueños sin importar cuán difícil parezca el camino.

A ellos, a quienes no puedo pagarles el fruto del sacrificio que culmina en el éxito hasta hoy logrado.

Con amor y admiración, les dedico este triunfo.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivo general.....	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Generalidades del frijol comba (<i>Phaseolus lunatus</i> L.).....	4
2.1.1 Clasificación taxonómica.....	4
2.1.2 Descripción morfológica.....	5
2.1.3 Características de la semilla.....	6
2.1.4 Importancia en México.....	7
2.2 Generalidades de las bacterias ácido-lácticas.....	7
2.2.1 Bacterias ácido-lácticas como probióticos.....	8
2.2.2 Bacterias ácido-lácticas como postbióticos.....	9
2.3 Postbióticos en la agricultura.....	10
2.3.1 Modulación hormonal (fitohormonas).....	10
2.3.2 Inducción de resistencia al estrés.....	11
2.3.3 Prevención y control de enfermedades.....	11
2.3.4 Mejora de la estructura del suelo.....	12
2.4 Potenciales aplicaciones en la germinación de semillas.....	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 Material vegetal.....	14
3.2 Bacterias y condiciones de cultivo.....	14

3.3 Obtención de postbióticos (sobrenadante libre de células).....	14
3.4 Ensayo de germinación <i>in vitro</i>	15
3.5 Determinación de parámetros de germinación.....	15
3.5.1 Porcentaje de germinación (PG).....	15
3.5.2 Tiempo medio de germinación (TMG).....	15
3.5.3 Índice de vigor de semilla-I (IVS-I).....	16
3.5.4 Longitud de radícula.....	16
3.5.5 Peso fresco y seco de radícula.....	16
3.6 Diseño experimental y análisis estadístico	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
4.1 Porcentaje de germinación (PG).....	18
4.2 Tiempo medio de germinación (TMG).....	18
4.3 Índice de vigor de semilla-I (IVS-I).....	19
4.4 Longitud de radícula.....	22
4.5 Peso fresco y seco de radícula.....	22
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el porcentaje de germinación (PG), tiempo medio de germinación (TMG) e índice de vigor de semilla-I (IVS-I) en frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.).....	20
Cuadro 2. Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para los efectos principales (tipo de solución y concentración) y su interacción sobre los parámetros de germinación del frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.).....	21

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Planta de frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.): a) hojas, b) flor, c) vainas y d) semillas. Adaptado de Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (s.f.)......	6
Figura 2. Principales tipos de postbióticos.....	10
Figura 3. Diagrama general del ensayo de germinación <i>in vitro</i> del frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.).....	17
Figura 4. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre la longitud de radícula en frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.....	24
Figura 5. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el peso fresco de radícula en frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.....	25
Figura 6. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el peso seco de radícula en frijol comba (<i>P. lunatus</i> L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.....	26

RESUMEN

El frijol comba (*Phaseolus lunatus* L.) es un cultivo de gran importancia cultural, económica y nutricional en México, particularmente en la región de Tierra Caliente, Guerrero. Pese a ello, su producción puede verse limitada durante las etapas iniciales de germinación y establecimiento vegetal, debido a la influencia de factores bióticos y abióticos que afectan el vigor y desarrollo temprano de las plántulas. En este contexto, las bacterias ácido-lácticas (BAL), así como compuestos derivados de su metabolismo (postbióticos), están siendo estudiadas por su potencial bioestimulante, capaz de promover el crecimiento vegetal y mejorar la respuesta fisiológica de las plantas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de postbióticos derivados de BAL sobre la germinación del frijol comba (*P. lunatus* L.), en función de la cepa bacteriana y concentración aplicada. Para ello, se obtuvieron sobrenadantes libres de células de *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1, *Lactocaseibacillus rhamnosus* SP1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112, los cuales se evaluaron a concentraciones de 1, 2, 4 y 6% (v/v). El ensayo de germinación se realizó bajo un diseño completamente al azar, en el que cada tratamiento estuvo conformado por seis unidades experimentales ($n=6$), con cinco semillas por unidad. Se determinó el porcentaje de germinación (PG), tiempo medio de germinación (TMG), índice de vigor de semilla-I (IVS-I), longitud de radícula, así como peso fresco y seco de radícula. Los resultados indicaron que el tratamiento derivado de SP1 al 4% (v/v) promovió significativamente ($p < 0.05$) el PG (70%). Por su parte, el tratamiento derivado de BLC1 al 4% (v/v) presentó incrementos significativos ($p < 0.05$) en el IVS-I (555.65), longitud de radícula (7.44 cm), peso fresco (1.31 g) y peso seco (0.11 g) de radícula, en comparación con el control negativo (agua) y control positivo (medio de cultivo). No se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos evaluados en el TMG. En general, los postbióticos derivados de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 poseen potencial bioestimulante al favorecer la germinación y desarrollo del frijol comba (*P. lunatus* L.), representando una alternativa biotecnológica para su aplicación en sistemas agrícolas.

Palabras clave: *Phaseolus lunatus* L., semilla, sobrenadante libre de células, germinación, bioestimulación.

I. INTRODUCCIÓN

Phaseolus lunatus L., conocido en México como frijol comba, es un cultivo de subsistencia con importante valor cultural, económico y nutricional para diversos grupos étnicos, particularmente en regiones como Tierra Caliente, en Guerrero, la Depresión del Balsas, en Puebla, Tlaxcala, Michoacán y Jalisco, y la Península de Yucatán (Vizcarra-Manríquez, 2024). Esta leguminosa se considera la cuarta especie más importante cultivada en la milpa (*i.e.*, sistema tradicional de policultivo asociado al maíz), lo que ha favorecido el desarrollo de una amplia diversidad de formas cultivadas en el país (Martínez-Castillo *et al.*, 2004). Pese a ello, su productividad y establecimiento en campo se ven afectados por factores como la baja calidad fisiológica de la semilla, limitado desarrollo inicial de las plántulas, condiciones ambientales adversas y uso excesivo de fertilizantes químicos, lo que compromete la sostenibilidad del cultivo (Martínez-Castillo *et al.*, 2015).

En este contexto, la germinación representa una de las etapas más críticas en el ciclo de vida de las plantas, ya que de ella depende el desarrollo inicial del cultivo. Un proceso germinativo eficiente favorece la emergencia uniforme de las plántulas, estimula el desarrollo radicular y mejora la capacidad de absorción de agua y nutrientes. Debido a ello, en los últimos años se han impulsado diversas estrategias orientadas a mejorar la germinación y crecimiento inicial de las plantas, entre las que destacan el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal y compuestos bioactivos de origen microbiano. Estas alternativas han demostrado múltiples beneficios, tales como la mejora en la absorción y aprovechamiento de nutrientes, incremento en las respuestas germinativas y fortalecimiento de los mecanismos de defensa vegetal frente a distintos tipos de estrés (Arinaitwe *et al.*, 2025; Sun *et al.*, 2024).

Es así que los postbióticos han adquirido un creciente interés debido a su potencial aplicación en la agricultura sostenible. Éstos son compuestos producidos por microorganismos durante su crecimiento y actividad metabólica, capaces de ejercer efectos benéficos aun en ausencia de células vivas (Vallejo-Córdoba *et al.*, 2020). Particularmente, las bacterias ácido-lácticas (BAL) pueden producir ácidos orgánicos, aminoácidos, proteínas, polisacáridos y vitaminas con potencial para estimular procesos fisiológicos asociados con la germinación y desarrollo vegetal. De hecho, estudios recientes han destacado las ventajas de estos compuestos en su aplicación como bioestimulantes y agentes de biocontrol en sistemas agrícolas sostenibles

(Pellegrini *et al.*, 2020). No obstante, a pesar del interés en el uso agrícola de postbióticos, la información relacionada con el efecto de compuestos derivados de BAL sobre la germinación y desarrollo inicial de leguminosas como el frijol comba (*P. lunatus* L.) aún es limitada.

1.1 Justificación

Actualmente, la agricultura enfrenta importantes desafíos que comprometen el crecimiento y establecimiento de los cultivos, especialmente en las etapas iniciales de desarrollo. Factores como las condiciones ambientales adversas y el uso excesivo de fertilizantes químicos están afectando negativamente la fertilidad del suelo y sostenibilidad agrícola. Debido a ello, ha surgido un creciente interés en el desarrollo de alternativas biotecnológicas que promuevan el crecimiento vegetal de manera más eficiente y sustentable.

En este contexto, diversos estudios han demostrado el potencial de algunos microorganismos para promover el crecimiento, desarrollo y funcionamiento fisiológico vegetal. En particular, las bacterias ácido-lácticas, así como los compuestos derivados de su metabolismo, pueden ejercer efectos benéficos sobre las plantas, al favorecer la absorción de nutrientes, producción de hormonas y control biológico de fitopatógenos.

Sin embargo, aún son limitados los estudios que evalúan su efecto sobre la germinación y el crecimiento inicial de semillas, especialmente en leguminosas como el frijol comba (*P. lunatus* L.). Por ello, la presente investigación evalúa el efecto de compuestos derivados de estas bacterias sobre parámetros de germinación de dicha especie, con el fin de generar evidencia científica sobre su posible aplicación como alternativa biotecnológica para una agricultura más sostenible.

1.2 Hipótesis

Postbióticos derivados de *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1, *Lactocaseibacillus rhamnosus* SP1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112 tienen un efecto bioestimulante sobre la germinación del frijol comba (*Phaseolus lunatus* L.), condicionado por la cepa bacteriana y concentración aplicada.

1.3 Objetivo general

Evaluar el efecto de postbióticos derivados de *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1, *Lacticaseibacillus rhamnosus* SP1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112 sobre la germinación del frijol comba (*Phaseolus lunatus* L.), en función de la cepa bacteriana y concentración aplicada.

1.4 Objetivos específicos

- Obtener postbióticos derivados de *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1, *Lacticaseibacillus rhamnosus* SP1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112.
- Aplicar los postbióticos obtenidos en un ensayo de germinación *in vitro* de frijol comba (*Phaseolus lunatus* L.).
- Determinar el efecto de la cepa bacteriana y concentración aplicada de postbióticos sobre los parámetros de germinación: porcentaje de germinación, tiempo medio de germinación, índice de vigor de semilla-I, longitud de radícula, peso fresco y seco de radícula.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del frijol comba (*Phaseolus lunatus* L.)

Phaseolus lunatus L. es la segunda especie de leguminosa del género *Phaseolus* con mayor distribución, superficie cultivada y consumo a nivel mundial. Conocida comúnmente como frijol comba, frijol lima o haba pallar, destaca por su relevancia agronómica, alimentaria y cultural. Se cultiva principalmente en regiones tropicales y subtropicales de América Central y del Sur, así como en África y Asia (Adebo, 2023).

Es una planta herbácea de ciclo plurianual, que puede presentar formas anuales o perennes. Posee un número cromosómico de $2n = 22$; sin embargo, existe una considerable variabilidad genética entre sus poblaciones. Exhibe hábitos de crecimiento determinados (tipo arbustivo) como indeterminados (tipo enredadera o voluble). Su reproducción es predominantemente autógama y la germinación es de tipo epigea (*i.e.*, cotiledones emergen de la semilla y se elevan por encima del suelo). En cuanto a sus requerimientos edafoclimáticos, tolera climas templados-cálidos (16-27 °C), un rango de precipitación de 800 a 1500 mm, y muestra preferencia por suelos bien drenados con un $pH > 6$ (Chukwunyere *et al.*, 2025).

De acuerdo con lo descrito por Esquivel *et al.* (1990), esta especie se puede clasificar en dos variedades botánicas: *P. lunatus* var. *lunatus*, que comprende los tipos domesticados, y *P. lunatus* var. *silvester*, correspondiente a los tipos silvestres. Dentro de los tipos domesticados se reconocen tres morfotipos definidos principalmente por el tamaño y forma de la semilla: a) Gran Lima (semilla grande y plana), b) Sieva (semilla mediana y plana) y c) Papa (semilla pequeña y redonda). Por su parte, los tipos silvestres, caracterizados por su variabilidad en el color, tamaño y forma de la semilla, se clasifican en tres acervos genéticos: a) Andino (A), cuya distribución geográfica abarca el sur de Ecuador y el norte de Perú, b) Mesoamericano I (MI), localizado en el centro-occidente de México y c) Mesoamericano II (MII), distribuido desde el sur de México hasta América Central y del Sur (Adebo, 2023; Martínez-Castillo, 2023).

2.1.1 Clasificación taxonómica

El frijol comba se clasifica taxonómicamente de acuerdo con el siguiente orden:

Dominio: Eukaryota

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Orden: Fabales
Familia: Fabaceae
Subfamilia: Faboideae
Tribu: Phaseoleae
Género: *Phaseolus*
Especie: *Phaseolus lunatus* L.

2.1.2 Descripción morfológica

La planta de frijol comba (**Figura 1**), como se mencionó anteriormente, puede presentar dos tipos de crecimiento: el tipo arbustivo, que alcanza *ca.* 0.6 m de altura, y el tipo enredadera, que puede desarrollar longitudes de entre 2 y 5 m. El tallo es herbáceo, cilíndrico y de diámetro variable, oscilando entre 0.5 y 1.5 cm. Por su parte, el sistema radical es de tipo pivotante, con una raíz principal que puede alcanzar profundidades de 30 a 60 cm, acompañada de numerosas raíces laterales delgadas.

Las hojas son compuestas, trifoliadas y alternas, con folíolos de forma ovada a lanceolada. Cada folíolo mide de 5 a 11 cm de longitud y de 3 a 10 cm de ancho, con margen entero y ápice acuminado. Los pecíolos tienen longitudes que varían entre 5 y 12 cm. El haz es opaco, glabro y de color verde oscuro, mientras que el envés presenta una coloración verde pálido, también glabro, con nervaduras primarias y secundarias bien definidas.

Las inflorescencias se disponen en racimos axilares que miden entre 5 y 20 cm de longitud. Mientras que las flores son de tipo papilionado, con la quilla en espiral, de un tamaño de 1.0 a 2.5 cm, y presentan una coloración variable que incluye tono blanco, crema, verdoso y lila. Finalmente, el fruto es una vaina dehiscente, de forma oblonga y ligeramente curvada, que termina en un ápice agudo orientado hacia la sutura dorsal. Presenta una longitud de 5 a 15 cm y un ancho de 1.5 a 3.0 cm, conteniendo generalmente entre 2 y 4 semillas (Chukwunyere *et al.*, 2025; López-Serna, 2022).

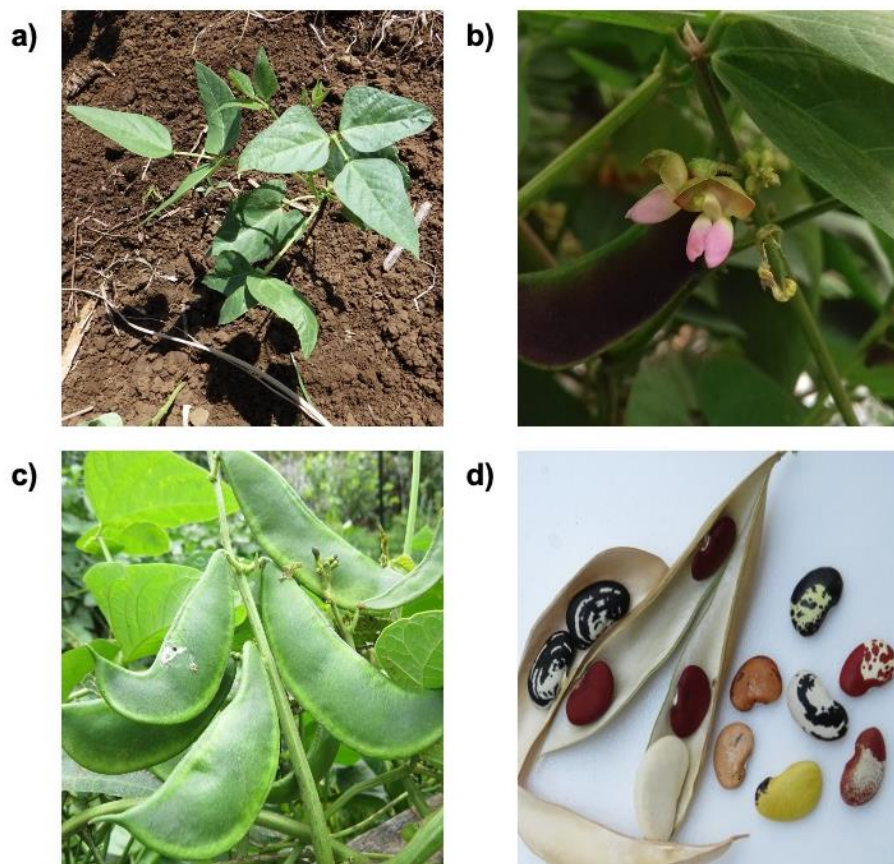


Figura 1. Planta de frijol comba (*P. lunatus* L.): a) hojas, b) flor, c) vainas y d) semillas. Adaptado de Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (s.f.), <https://www.cicy.mx/sitios/red-lunatus-espanol>.

2.1.3 Características de la semilla

Las semillas del frijol comba se desarrollan dentro de la vaina, la cual presenta una coloración verde en estado inmaduro y se torna marrón al alcanzar la madurez. Se caracterizan por su amplia variabilidad en el color de la testa, que incluye tonalidades blanquecinas, verdes, amarillas, marrones, rojas y negras, así como diversos patrones moteados o combinados (**Figura 1d**). Asimismo, presentan variación en el tamaño y forma, la cual puede ser reniforme, orbicular o aplanada. El hilio es de tamaño reducido, con posición central y de forma oblonga.

En términos morfométricos, las semillas presentan un peso promedio cercano a 145 g por cada 100 semillas, con un grosor aproximado de 0.72 cm, un ancho que oscila entre 0.8 y 1.5 cm y una longitud de 1.0 a 1.5 cm (Adebo, 2023). Los cotiledones muestran una coloración blanca o verde, y durante la germinación se observa un rápido desarrollo del sistema radical.

Desde el punto de vista organoléptico, las semillas presentan un sabor predominantemente almidonado. Mientras que su composición proximal se caracteriza por un alto contenido de carbohidratos ($\sim 65 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), proteínas ($\sim 26 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), fibra dietética ($\sim 22 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) y minerales ($\sim 5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), así como por un bajo contenido de grasa ($\sim 2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Asimismo, representan una fuente importante de aminoácidos esenciales, tales como lisina, fenilalanina, treonina, valina, isoleucina e histidina (Gavilan-Figari *et al.*, 2024).

Es importante señalar que las características previamente descritas pueden variar en función del genotipo, así como de diversos factores agronómicos y ambientales. Esta variabilidad fue reportada en un estudio realizado previamente por nuestro grupo de trabajo (Nambo-García, 2022).

2.1.4 Importancia en México

El frijol comba es un cultivo que forma parte de sistemas agrícolas tradicionales manejados por diversos grupos étnicos, particularmente en regiones como Tierra Caliente, en Guerrero, la Depresión del Balsas, en Puebla, Tlaxcala, Michoacán y Jalisco, y la Península de Yucatán (Vizcarra-Manríquez, 2024). Además de su relevancia alimentaria, posee un importante valor cultural asociado con la conservación e intercambio de variedades criollas adaptadas a condiciones locales, lo que contribuye a la preservación del germoplasma nativo y de la diversidad genética de la especie (López-Alcocer *et al.*, 2016).

Asimismo, constituye una fuente importante de ingresos y sustento para numerosas familias rurales, ya que su producción y comercialización forman parte de las economías locales y de las prácticas agrícolas tradicionales (Nambo-García, 2022). No obstante, su expansión y aprovechamiento en otras regiones del país han sido limitados por la escasa identificación de genotipos con potencial agronómico y reducido conocimiento sobre los factores biológicos y ambientales asociados con su desarrollo y productividad (Martínez-Castillo *et al.*, 2015).

2.2 Generalidades de las bacterias ácido-lácticas

Las bacterias ácido-lácticas (BAL) son microorganismos Gram positivos, de forma cocoide o bacilar, no esporulados, sin motilidad, anaerobios o anaerobios facultativos, mesófilos y catalasa negativos (Akpogheli *et al.*, 2025). Además, se caracterizan por la producción de ácido láctico, derivado de la fermentación de diferentes carbohidratos. De forma natural, se

encuentran en diversos nichos ecológicos, incluyendo alimentos de origen lácteo, cárnico y vegetal, así como el tracto gastrointestinal y urogenital de humanos y animales, además del suelo y agua (Ayivi *et al.*, 2020).

De acuerdo con la clasificación taxonómica actual, las BAL pertenecen al filo Firmicutes, clase Bacilli y orden Lactobacillales. Este orden se encuentra subdividido en seis familias: Aerococcaceae, Carnobacteriaceae, Enterococcaceae, Lactobacillaceae, Leuconostocaceae y Streptococcaceae. Asimismo, estas familias agrupan 40 géneros representativos, incluyendo *Aerococcus*, *Alloiococcus*, *Carnobacterium*, *Dolosigranulum*, *Enterococcus*, *Fructobacillus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Paralactobacillus*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus* y *Weissella* (Ayivi *et al.*, 2020).

Dependiendo de sus vías de fermentación, las BAL se clasifican en dos grupos principales: homofermentativas y heterofermentativas. Las homofermentativas degradan azúcares de tipo hexosa mediante la vía de Embden-Meyerhof-Parnas, produciendo únicamente ácido láctico. Por su parte, las heterofermentativas utilizan la vía de la fosfoetolasa, a partir de la cual se genera ácido láctico junto con otros compuestos como etanol, dióxido de carbono (CO₂) y ácido acético (Wang *et al.*, 2021). Además, son reconocidas por su capacidad para producir otros compuestos bioactivos durante la fermentación, entre ellos exopolisacáridos, péptidos y aminoácidos, bacteriocinas, ácidos orgánicos y vitaminas (Aguirre-García *et al.*, 2025).

2.2.1 Bacterias ácido-lácticas como probióticos

Las BAL son uno de los grupos microbianos más relevantes en el ámbito de los probióticos. Al ser consideradas como seguras por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (Food and Drug Administration, FDA), se utilizan en diversas industrias, como la alimentaria, farmacéutica y agrícola. De acuerdo con la definición propuesta por Hill *et al.* (2014), los probióticos son “*microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren beneficios para la salud del hospedero*”. En este contexto, estas bacterias, mediante la producción de diversos compuestos bioactivos, cumplen con tal criterio. De hecho, presentan múltiples propiedades metabólicas y tecnológicas, tales como actividad acidificante, proteolítica, lipolítica y antioxidante; además, tienen la capacidad de fortalecer la función de la barrera intestinal, modular la microbiota intestinal, estimular el sistema inmunitario y favorecer la absorción de nutrientes (Aguirre-García *et al.*, 2025).

Entre los géneros más representativos de BAL probióticas se encuentran *Bifidobacterium*, *Lactobacillus* (recientemente reclasificado por científicos en 25 nuevos géneros) (Zheng *et al.*, 2020), *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Pediococcus* y *Streptococcus*. Para ser consideradas como tales, deben cumplir una serie de características esenciales que aseguren su funcionalidad. Entre ellas se incluyen la ausencia de patogenicidad, resistencia al tracto gastrointestinal, adhesión a la mucosa intestinal, viabilidad y estabilidad durante el procesado y almacenamiento (Binda *et al.*, 2020).

2.2.2 Bacterias ácido-lácticas como postbióticos

Aunque la definición de probiótico establece que las BAL deben estar vivas/viables para ejercer sus efectos benéficos, se ha propuesto que tanto sus células inactivadas/no viables como los compuestos derivados de su metabolismo también pueden proporcionar algunos de estos efectos. En este sentido, Salminen *et al.* (2021) definen a los postbióticos como una “*preparación de células inactivadas y/o sus componentes celulares y productos metabólicos que confieren beneficios a la salud del hospedero*”.

Esta preparación abarca una amplia diversidad de sustancias (**Figura 2**), entre ellas proteínas, péptidos, exopolisacáridos, ácidos orgánicos y vitaminas, así como compuestos intracelulares (*e.g.*, enzimas y nucleótidos) y estructurales de la pared celular (*e.g.*, peptidoglicano, ácidos teicoico y lipoteicoico) (Vallejo-Córdoba *et al.*, 2020). Así, en conjunto, estas sustancias ejercen sus efectos mediante interacciones directas con el hospedero, imitando actividades similares a las de las células viables. Su acción involucra diversos mecanismos, entre los que destacan la modulación del sistema inmunitario, fortalecimiento de la barrera intestinal y la actividad antiinflamatoria, antioxidante y antimicrobiana (Ma *et al.*, 2023).

Actualmente, se ha descrito que los postbióticos pueden obtenerse mediante diversas técnicas tanto a nivel de laboratorio como industrial, incluyendo: a) métodos térmicos (pasteurización y esterilización), b) métodos no térmicos (radiación, luz ultravioleta (UV) y sonicación) y c) tecnologías emergentes (calentamiento óhmico y fluidos supercríticos) (Vallejo-Córdoba *et al.*, 2020). Es importante destacar que la técnica utilizada para su obtención puede influir en la composición, integridad y estabilidad de los compuestos, lo que puede impactar de manera significativa en sus actividades biológicas.

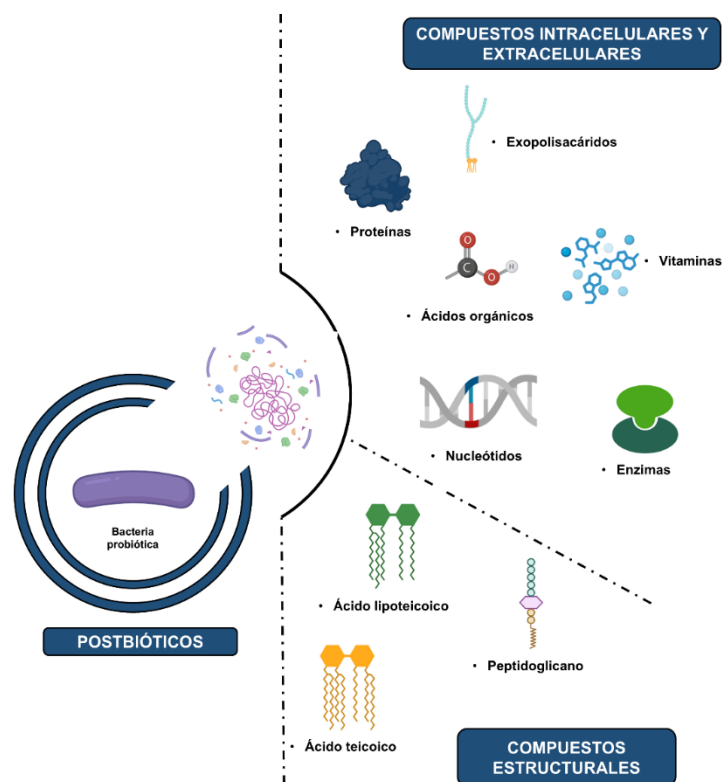


Figura 2. Principales tipos de postbióticos. Creado con BioRender.com.

2.3 Postbióticos en la agricultura

Los postbióticos han adquirido una creciente relevancia en el ámbito agrícola debido a sus efectos benéficos sobre el crecimiento y salud de las plantas, contribuyendo al aumento de la productividad de los cultivos y a la reducción de la dependencia de agroquímicos (Menendez & Garcia-Fraile, 2017). Estos compuestos pueden favorecer el desarrollo vegetal mediante distintos mecanismos de interacción con las plantas, los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Modulación hormonal (fitohormonas)

Los postbióticos pueden actuar como análogos o moduladores de fitohormonas, influyendo directamente en el crecimiento y desarrollo vegetal. Diversas especies de BAL son capaces de sintetizar y liberar compuestos con actividad hormonal, tales como auxinas, citoquininas, giberelinas y precursores del etileno, que participan en la activación de rutas de señalización celular involucradas en el metabolismo vegetal. Por ejemplo, auxinas como el ácido indol-3-acético (AIA) y ácido indol-3-láctico (AIL) estimulan la elongación celular, así como la

formación y desarrollo del sistema radicular. Las citoquininas, incluyendo la zeatina, zeatina ribósido e isopentenil adenina, promueven la división celular y regulan el desarrollo de tejidos meristemáticos. Las giberelinas, tales como el ácido giberélico (GA₃), giberelina A₄ (GA₄) y giberelina A₇ (GA₇), participan en procesos como la germinación y emergencia de semillas, crecimiento del tallo y hojas, inducción floral y desarrollo de frutos. Finalmente, el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), el cual puede ser absorbido por la planta y convertido en etileno, regula procesos fisiológicos como la maduración de frutos, floración y abscisión foliar (Jaffar *et al.*, 2023; Menendez & Garcia-Fraile, 2017).

2.3.2 Inducción de resistencia al estrés

El estrés abiótico en plantas es provocado por factores ambientales adversos que alteran sus procesos fisiológicos y metabólicos, comprometiendo su desarrollo y supervivencia. Estos factores pueden clasificarse en distintos tipos, incluyendo estrés térmico, hídrico, lumínico, nutricional y salino (Zhang *et al.*, 2023). Bajo condiciones de estrés, las plantas generan especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) que, en concentraciones elevadas, pueden inducir daño oxidativo a nivel celular. En este contexto, diversos postbióticos han demostrado poseer actividad antioxidante directa. Algunos ácidos orgánicos (*e.g.*, ácidos láctico, acético y málico), aminoácidos y sus derivados (*e.g.*, cisteína, prolina y glutamato), polioles (*e.g.*, inositol, sorbitol y manitol) y exopolisacáridos tienen la capacidad de interactuar con las ROS y neutralizarlas mediante mecanismos de óxido-reducción o captura de radicales libres. Adicionalmente, contribuyen de forma indirecta a la protección celular al modular el equilibrio osmótico, regular la acidez citosólica y estabilizar la estructura proteica, lo que favorece la tolerancia de las plantas frente al estrés (Sunita *et al.*, 2020).

2.3.3 Prevención y control de enfermedades

Las postbióticos pueden ejercer actividad antimicrobiana contra una variedad de patógenos vegetales, ya sea mediante la inhibición directa de su crecimiento o a través de la interferencia con sus factores de virulencia. En este sentido, compuestos como los ácidos orgánicos (*e.g.*, ácidos láctico, propiónico y fórmico) pueden reducir el pH intracelular y afectar la función de la membrana y transporte activo de nutrientes. Asimismo, las bacteriocinas, incluyendo la

nisina, pediocina y plantaricina A, son capaces de inhibir la síntesis de proteínas, inducir la formación de poros en la membrana e interferir con la replicación y transcripción del ADN. Por otro lado, compuestos como ácidos grasos hidroxilados (saturados y monoinsaturados), fenoles y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) contribuyen al efecto antimicrobiano al alterar la integridad y permeabilidad de la membrana, inducir daño en proteínas y enzimas esenciales, y generar estrés oxidativo. En conjunto, estos postbióticos han demostrado efectividad en el control de patógenos fúngicos y bacterianos, incluyendo especies de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Botrytis* y *Pseudomonas* (Gómez-Godínez *et al.*, 2023; Narayanan & Glick, 2022).

2.3.4 Mejora de la estructura del suelo

El crecimiento óptimo de las plantas depende directamente de un suelo con estructura física y composición químico-biológica adecuadas. Por un lado, se ha descrito que las BAL pueden sintetizar compuestos capaces de regenerar y mejorar la estructura edáfica. En particular, los exopolisacáridos actúan como agentes aglutinantes que facilitan la formación de agregados entre partículas minerales y materia orgánica. Lo anterior se traduce en un incremento de la porosidad, aireación, retención de agua y movilidad de nutrientes en el suelo. Asimismo, la producción de sideróforos incrementa la disponibilidad de hierro (Fe) para las plantas y limita su aprovechamiento por patógenos, contribuyendo indirectamente a la sanidad del suelo (John *et al.*, 2020). Por otra parte, compuestos como aminoácidos y péptidos, fenoles, policétidos, terpenos y vitaminas pueden estimular la actividad de la microbiota nativa del suelo al actuar como fuentes de carbono, señales químicas y moduladores del microambiente edáfico. Este efecto favorece el desarrollo de comunidades microbianas benéficas, las cuales participan en el ciclo de nutrientes, descomposición de la materia orgánica y estimulación del crecimiento vegetal (Chen *et al.*, 2024).

2.4 Potenciales aplicaciones en la germinación de semillas

La germinación de semillas es un proceso fisiológico clave que determina el establecimiento y desarrollo inicial de las plantas, influyendo directamente en la productividad de los cultivos. En este contexto, el desarrollo de estrategias que favorezcan este proceso ha adquirido una relevancia creciente en la agricultura moderna. En particular, los postbióticos han emergido

como una alternativa prometedora en este ámbito, ya que diversos estudios han demostrado su capacidad para mejorar la activación metabólica de las semillas y favorecer de manera positiva el proceso de germinación.

Por ejemplo, en el estudio de Cruz *et al.* (2022) se evaluó el efecto bioestimulante sobre la germinación y el crecimiento inicial de *Citrus limon* L. (limón), *Citrus sinensis* L. (naranja dulce) y *Poncirus trifoliata* L. (naranja agria), mediante la aplicación de *Enterococcus mundii* CRL35 y *Enterococcus faecium* CRL1877 y CRL1879, así como de sus sobrenadantes libres de células. Los resultados mostraron que, en las tres especies, los tratamientos incrementaron la germinación (90-100%), así como la longitud del tallo (25%), su diámetro (75%) y la longitud de la raíz (44%), en comparación con los controles. Asimismo, se observó mayor formación de raíces secundarias, lo que evidencia un efecto positivo sobre el desarrollo del sistema radicular.

Por otra parte, Chávez-García *et al.* (2024) determinaron la capacidad de *Lactiplantibacillus plantarum* 14917 y *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 para mejorar la germinación de semillas pertenecientes a distintos grupos de cultivos, incluyendo leguminosas (lentejas marrones y frijol mungo), oleaginosas (sésamo y lino) y hortalizas (remolacha y rábano) y cereales (mijo, triticale y centeno). Independientemente del tipo de semilla, se observó un incremento en el porcentaje (90-100%) y velocidad de germinación (25-40%), asociado además con un aumento en la concentración de auxinas (0.13-29.17 mg kg⁻¹). Estos hallazgos confirman la eficacia de dichas bacterias, a través de la producción de metabolitos activos, en la promoción del establecimiento inicial de las plántulas.

Finalmente, Ruíz-Aymá *et al.* (2026) evaluaron el efecto de la aplicación de sobrenadantes libres de células derivados de *Lysinibacillus xylanilyticus* B7 y *Bacillus cereus* B9 sobre la germinación y crecimiento de *Hibiscus sabdariffa* L. (flor de Jamaica) y *Prosopis juliflora* L. (mezquite). En general, el sobrenadante de *L. xylanilyticus* B7 mejoró la germinación de ambas especies (96%); asimismo, promovió el crecimiento temprano de las plántulas, con mejoras en la longitud del tallo (1.70 mm en *H. sabdariffa* L. y 1.40 mm en *P. juliflora* L.), ancho de la hoja (8.20 mm y 8.90 mm, respectivamente) y peso fresco (0.13 g y 0.17 g, respectivamente), en comparación con el control (agua destilada). Se identificó la presencia de polisacáridos y cumarinas, asociados con la estimulación del proceso de germinación.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material vegetal

Las semillas del frijol comba (*P. lunatus* L., genotipo Pinta violenta) fueron recolectadas en la comunidad de Valle Luz, en el municipio de San Miguel Totolapan, Guerrero, México (latitud: 18°07'47", longitud: 100°20'23" y elevación: 299 m s.n.m.), y posteriormente trasladadas al Laboratorio de Biotecnología y Biología Molecular de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro para su acondicionamiento. Éstas se lavaron con agua destilada y detergente comercial para eliminar impurezas y partículas adheridas. Después, se sometieron a desinfección superficial mediante inmersión en hipoclorito de sodio (NaClO, 2.5% v/v) durante 3 min, seguido de etanol (70% v/v) durante otros 3 min. Entre cada tratamiento se realizaron dos enjuagues con agua destilada estéril. Finalmente, se secaron a temperatura ambiente bajo condiciones estériles durante 20 min y se almacenaron en frascos estériles a 4 °C hasta su uso (Yaghoubian *et al.*, 2022).

3.2 Bacterias y condiciones de cultivo

Las cepas de BAL probióticas, *i.e.* *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1, *Lactocaseibacillus rhamnosus* SP1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112, se obtuvieron de Sacco® System (Cadorago, Italia). Para su reactivación, se cultivaron en caldo de Man, Rogosa y Sharpe (MRS; BD Difco®, St. Louis, MO, USA), suplementado con L-cisteína (0.05% p/v) (Favela Pro S.A. de C.V., Sinaloa, México), según correspondiera, e incubaron a 37 °C durante 24 h. Los cultivos obtenidos se emplearon como inóculos estándar en la Sección 3.3.

3.3 Obtención de postbióticos (sobrenadante libre de células)

Las cepas se sub-cultivaron en caldo MRS (BD Difco®) utilizando un inóculo estándar del 1% (v/v) e incubaron a 37 °C durante 48 h. Tras la incubación, las células bacterianas se separaron por centrifugación (4500 rpm durante 10 min) y se recuperó el sobrenadante, que posteriormente se filtró a través de un filtro de jeringa estéril (membrana de PTFE, tamaño de poro de 0.22 µm y 25 mm de diámetro) (Allpure Biotechnology Co. Ltd., Wuhan, China). El filtrado obtenido se denominó, en adelante, sobrenadante libre de células (SLC).

3.4 Ensayo de germinación *in vitro*

El ensayo de germinación *in vitro* se llevó a cabo según lo descrito por Yaghoubian *et al.* (2022), con algunas modificaciones. Brevemente, las semillas se germinaron en placas de Petri estériles (poliestireno, 90 mm de diámetro y 15 mm de alto), revestidas con papel de filtro (poro medio; FYE de México, S.A. de C.V., Ciudad de México, México). Las soluciones de tratamiento se prepararon con agua destilada estéril y SLC a concentraciones de 1, 2, 4 y 6% (v/v). Como control negativo se utilizó agua destilada estéril. Asimismo, para descartar el efecto *per se* del medio de cultivo, se empleó caldo MRS estéril (BD Difco®) a las mismas concentraciones que los tratamientos, como control positivo. El papel de filtro se humedeció con 8 mL de cada tratamiento y las placas de Petri se sellaron con película plástica para prevenir la contaminación y pérdida de humedad. Posteriormente, se incubaron a 25 °C en oscuridad durante 5 días. Cada semilla se consideró germinada cuando su radícula alcanzó *ca.* 2 mm de longitud. La **Figura 3** presenta el diagrama general de trabajo para dicho ensayo.

3.5 Determinación de parámetros de germinación

Los parámetros de germinación que se describen a continuación se determinaron conforme a lo propuesto por Yaghoubian *et al.* (2022) y Abbasi-Khalaki *et al.* (2019).

3.5.1 Porcentaje de germinación (PG)

La germinación se registró a intervalos de 24 h durante todo el experimento, y el porcentaje de germinación (PG) se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$PG (\%) = \frac{N_g}{N_t} * 100$$

Donde N_g corresponde al número de semillas germinadas y N_t al número total de semillas sembradas por placa.

3.5.2 Tiempo medio de germinación (TMG)

El tiempo medio de germinación (TMG) se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$TMG \text{ (días)} = \frac{\sum T_i * N_i}{\sum N_t}$$

Donde T_i corresponde al tiempo transcurrido desde la siembra hasta la observación (día), N_i al número de semillas germinadas en el intervalo de tiempo y N_t al número total de semillas germinadas.

3.5.3 Índice de vigor de semilla-I (IVS-I)

El índice de vigor de semilla-I (IVS-I) se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$IVS-I = PG * longitud \text{ de radícula}$$

Donde PG corresponde al porcentaje de germinación.

3.5.4 Longitud de radícula

Al finalizar el experimento, la longitud de radícula (cm) se determinó utilizando el software ImageJ (disponible en: <https://imagej.net/ij/>). La longitud de cada radícula se registró de manera individual y posteriormente se sumó para obtener la longitud total de las semillas germinadas por placa.

3.5.5 Peso fresco y seco de radícula

Las radículas evaluadas en la Sección 3.5.4 se separaron de los cotiledones y se determinó su peso fresco (g). Posteriormente, se secaron en una estufa (modelo HS35-AIA; Novatech[®], Jalisco, México) a 70 °C durante 24 h, y se registró el peso seco (g) correspondiente al total de las semillas germinadas por placa.

3.6 Diseño experimental y análisis estadístico

El ensayo de germinación se realizó bajo un diseño completamente al azar (DCA), en el cual cada placa de Petri se consideró como una unidad experimental. Para cada tratamiento se establecieron seis réplicas independientes ($n=6$), con cinco semillas por placa. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar (DE).

Para evaluar el efecto del SLC frente al control negativo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey-Kramer para identificar diferencias significativas entre tratamientos, considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$. Por otro lado, para descartar el efecto *per se* del medio de cultivo, los datos se analizaron mediante un ANOVA de dos vías, considerando como factor A el tipo de solución (control positivo o SLC) y como factor B la concentración aplicada, así como su interacción. Se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey-Kramer para la identificación de diferencias significativas, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el software InfoStat (disponible en: <http://www.infostat.com.ar>).

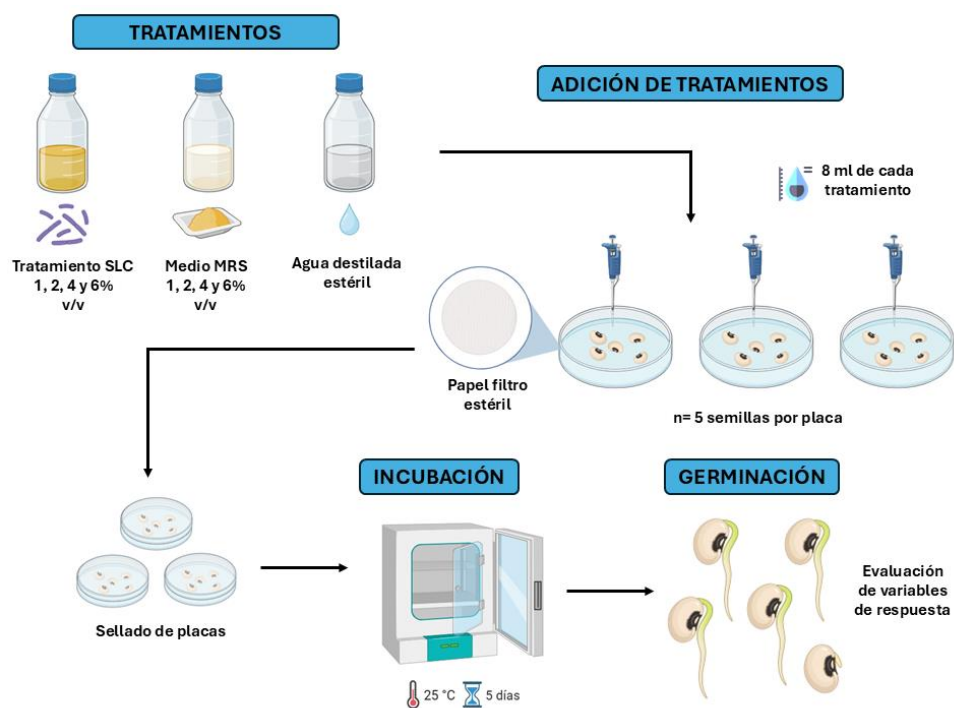


Figura 3. Diagrama general del ensayo de germinación *in vitro* del frijol comba (*P. lunatus* L.).

Creado con BioRender.com.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Porcentaje de germinación (PG)

En el **Cuadro 1** se muestra el efecto de los SLC sobre el PG del frijol comba (*P. lunatus* L.). Los valores oscilaron entre 40 (control positivo al 4% v/v) y 73.33% (*B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% v/v). El ANOVA de una vía no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos con SLC y el control negativo. Sin embargo, al comparar los SLC con el control positivo mediante ANOVA de dos vías (**Cuadro 2**), únicamente el tratamiento derivado de *L. rhamnosus* SP1 al 4% (v/v) mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), registrando un PG de 70%, superior al observado en el control a la misma concentración. Aunque el comportamiento general del PG fue similar entre los controles y tratamientos evaluados, se observó una tendencia al incremento de la germinación en todos los SLC.

La etapa inicial de germinación está condicionada por procesos fisiológicos regulados por la activación metabólica de la semilla y movilización de sus reservas nutritivas. En este sentido, la inoculación con células bacterianas o con compuestos derivados de éstas (postbióticos) no necesariamente se traduce en un aumento marcado del PG; sin embargo, si podría ejercer efectos favorables sobre otros parámetros asociados con el desarrollo temprano de la plántula (Finch-Savage & Bassel, 2016).

Resultados similares fueron reportados por Núñez *et al.* (2021), quienes evaluaron el efecto bioestimulante de cepas bacterianas pertenecientes a los géneros *Bacillus* sp., *Azotobacter* sp. y *Rhizobium* sp. sobre semilla de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). El control y tratamientos presentaron *ca.* 90% de germinación sin diferencias significativas ($p > 0.05$). Se sugiere que la respuesta a este tipo de bioinoculantes puede manifestarse en otras variables relacionadas con el crecimiento inicial.

4.2 Tiempo medio de germinación (TMG)

El efecto de los SLC sobre el TMG del frijol comba (*P. lunatus* L.) se presenta en el **Cuadro 1**. Los valores fluctuaron entre 2.05 (*B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 2% v/v) y 2.90 días (*L. rhamnosus* SP1 al 6% v/v). El ANOVA de una vía no evidenció diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos con SLC y el control negativo; de igual forma, el ANOVA

de dos vías mostró ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto al control positivo a la misma concentración (**Cuadro 2**).

Considerando que un menor TMG se asocia con una germinación más rápida, los resultados sugieren que los SLC no modificaron la velocidad del proceso germinativo, debido a que los valores obtenidos fueron similares entre tratamientos y controles. Sin embargo, el menor TMG observado en el tratamiento derivado de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 2% (v/v) podría indicar una tendencia hacia una activación más temprana de los procesos metabólicos relacionados con la imbibición y emergencia de la radícula.

Scaram et al. (2025) sugieren que las variaciones en el TMG durante una etapa temprana de germinación están asociadas con el genotipo de la semilla, así como con una interacción entre compuestos de reserva y comunidades microbianas asociadas de forma natural. Se ha descrito que en frijol común (*P. vulgaris* L.), la incorporación de microorganismos exógenos o de sus postbióticos tiende a manifestar efectos en etapas post-germinativas (Scaram et al., 2025).

4.3 Índice de vigor de semilla-I (IVS-I)

En el **Cuadro 1** se reporta el efecto de los SLC sobre el IVS-I en frijol comba (*P. lunatus* L.). Los valores se situaron entre 80.88 (control positivo al 4% v/v) y 555.65 (*B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% v/v), lo que evidencia una marcada variabilidad entre tratamientos. Aunque el ANOVA de una vía no evidenció diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto al control negativo, algunos SLC presentaron incrementos notables en el siguiente orden: *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% (v/v) (555.65) > *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 1% (v/v) (436.72) > *L. plantarum* BG112 al 1% (v/v) (395.07). Por otra parte, el ANOVA de dos vías indicó diferencias significativas ($p < 0.05$; **Cuadro 2**) para el tratamiento derivado de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% (v/v), cuyo IVS-I fue superior al del control positivo a la misma concentración.

Se ha reportado que un mayor IVS-I podría estar relacionado con la presencia de compuestos capaces de estimular la elongación y división celular, así como de regular vías metabólicas y hormonales involucradas en la etapa inicial de desarrollo vegetal (Rouphael & Colla, 2020). De hecho, Padilha et al. (2024) mencionan que la aplicación de ciertos compuestos exógenos incrementa el vigor de las semillas mediante la modulación de la actividad enzimática durante

la germinación (*e.g.*, fitasa y α -amilasa), resultando en la formación de plántulas con mayor rendimiento en biomasa.

En este sentido, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Meza *et al.* (2022), quienes observaron un incremento en el IVS-I (40%) de semilla de frijol común (*P. vulgaris* L.) sometida a estrés salino mediante la inoculación de las bacterias *Bacillus proteolyticus* Cyn1 y *Bacillus safensis* Cyn2.

Cuadro 1. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el porcentaje de germinación (PG), tiempo medio de germinación (TMG) e índice de vigor de semilla-I (IVS-I) en frijol comba (*P. lunatus* L.).

Tratamiento		PG (%)	TMG (días)	IVS-I
Control negativo		60.00 $\pm$ 17.89	2.27 $\pm$ 0.31	146.48 $\pm$ 44.91
Control positivo	1%	60.00 $\pm$ 17.89	2.27 $\pm$ 0.44	255.59 $\pm$ 150.79
	2%	60.00 $\pm$ 21.91	2.62 $\pm$ 0.86	288.39 $\pm$ 156.17
	4%	40.00 $\pm$ 12.65	2.77 $\pm$ 0.66	80.88 $\pm$ 49.28
	6%	56.66 $\pm$ 26.58	2.75 $\pm$ 0.42	203.31 $\pm$ 264.43
BLC1	1%	70.00 $\pm$ 20.98	2.22 $\pm$ 0.29	436.72 $\pm$ 205.30
	2%	56.66 $\pm$ 23.38	2.05 $\pm$ 0.21	379.15 $\pm$ 189.63
	4%	73.33 $\pm$ 16.33	2.37 $\pm$ 0.44	555.65 $\pm$ 175.31*
	6%	53.33 $\pm$ 20.66	2.34 $\pm$ 0.68	274.73 $\pm$ 125.15
SP1	1%	43.33 $\pm$ 15.06	2.22 $\pm$ 0.40	151.46 $\pm$ 39.21
	2%	53.33 $\pm$ 16.33	2.33 $\pm$ 0.30	264.37 $\pm$ 123.52
	4%	70.00 $\pm$ 20.98*	2.39 $\pm$ 0.35	232.08 $\pm$ 79.68
	6%	50.00 $\pm$ 20.98	2.90 $\pm$ 0.65	149.55 $\pm$ 58.30
BG112	1%	66.66 $\pm$ 35.02	2.25 $\pm$ 1.17	395.07 $\pm$ 274.16
	2%	70.00 $\pm$ 30.33	2.57 $\pm$ 0.46	389.05 $\pm$ 295.41
	4%	63.33 $\pm$ 34.45	2.78 $\pm$ 1.44	154.33 $\pm$ 104.22
	6%	60.00 $\pm$ 17.89	2.51 $\pm$ 0.50	128.27 $\pm$ 69.66

Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el control positivo y el SLC para cada bacteria, a una misma concentración.

Cuadro 2. Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para los efectos principales (tipo de solución y concentración) y su interacción sobre los parámetros de germinación del frijol comba (*P. lunatus* L.).

		gl	PG F-radio	p valor	TMG F-radio	p valor	IVS-I F-radio	p valor	LR F-radio	p valor	PF F-radio	p valor	PS F-radio	p valor
BLC1	Tipo de solución (A)	1	2.41	0.1284	5.27	0.0271	16.46	0.0002	23.99	<0.0001	12.75	0.0009	10.24	0.0027
	Concentración (B)	3	0.55	0.6503	1.03	0.39	0.91	0.4424	1.02	0.3928	0.65	0.5885	0.38	0.7664
	Interacción (A*B)	3	2.14	0.1097	0.5	0.6854	3.42	0.0263	2.32	0.0901	1.97	0.1341	2.11	0.1142
SP1	Tipo de solución (A)	1	0	>0.9999	0.86	0.3602	0.04	0.8449	0.17	0.6841	0.0021	0.9635	0.22	0.6425
	Concentración (B)	3	0.15	0.9315	2.35	0.0866	1.81	0.1611	2.96	0.0435	2.23	0.0999	1.76	0.1712
	Interacción (A*B)	3	3.33	0.0288	0.6	0.6206	2.02	0.126	0.62	0.6082	1.32	0.2805	1.11	0.3582
BG112	Tipo de solución (A)	1	2.12	0.1534	0.11	0.7435	1.15	0.2906	0.07	0.7955	0.21	0.6455	0.2	0.6588
	Concentración (B)	3	0.65	0.5892	0.84	0.482	4.03	0.0135	5.38	0.0033	3.76	0.018	3.15	0.0355
	Interacción (A*B)	3	0.35	0.7917	0.05	0.9846	0.71	0.5522	0.4	0.7524	0.87	0.4633	1.1	0.329

gl, grados de libertad; PG, porcentaje de germinación; TMG, tiempo medio de germinación; IVS-I, índice de vigor de semilla-I; LR, longitud de radícula; PF, peso fresco de radícula; PS, peso seco de radícula.

4.4 Longitud de radícula

En la **Figura 4** se representa el efecto de los SLC sobre la longitud de radícula en frijol comba (*P. lunatus* L.). Los valores variaron entre 2.01 (control positivo al 4% v/v) y 7.44 cm (*B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% v/v). En relación con el control negativo, el ANOVA de una vía evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) para algunos tratamientos con SLC, destacando aquellos derivados de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1, los cuales promovieron un mayor crecimiento radicular. Por el contrario, el ANOVA de dos vías no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$; **Cuadro 2**) al comparar los tratamientos con el control positivo a la misma concentración.

Kowalska & Wrzodak (2025) reportan que las BAL pueden producir compuestos (e.g., ácidos orgánicos, aminoácidos y vitaminas) con actividad similar a fitohormonas. Éstos participan como precursores metabólicos esenciales para la síntesis de proteínas y enzimas asociadas al desarrollo radicular, promoviendo la formación de raíces más largas y vigorosas. Lo anterior podría explicar el efecto positivo observado en *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1.

De manera similar, Meza *et al.* (2026) desarrollaron microencapsulados de hidrogel con dos bacterias promotoras del crecimiento vegetal, *B. proteolyticus* Cyn1 y *B. safensis* Cyn2. La aplicación de los tratamientos promovió el crecimiento radicular en tres cultivares de frijol común (*P. vulgaris* L.), registrándose longitudes de raíz de ca. 6-13 cm. El efecto se atribuyó a la presencia de compuestos bioactivos producidos por dichas bacterias.

4.5 Peso fresco y seco de radícula

El efecto de los SLC sobre el peso fresco y seco de radícula en frijol comba (*P. lunatus* L.) se muestra en las **Figuras 5 y 6**, respectivamente. En cuanto al peso fresco, los valores se encontraron entre 0.14 (control positivo al 4% v/v) y 1.31 g (*B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% v/v), mientras que el peso seco varió entre 0.015 y 0.11 g para los mismos tratamientos, respectivamente. En ambos casos, el ANOVA de una vía indicó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos con SLC y el control negativo, destacando incrementos en el peso fresco con el siguiente orden: *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% (v/v) (1.31 g) > *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 1% (v/v) (1.147 g) > *L. plantarum* BG112 al 1% (v/v) (1.229 g). De manera consistente, estos tratamientos presentaron los mayores valores de peso seco (0.11, 0.087 y 0.101 g, respectivamente). Por el contrario, el ANOVA de dos vías no mostró

diferencias significativas ($p > 0.05$; **Cuadro 2**) al comparar los tratamientos con el control positivo a la misma concentración.

El estado fisiológico de la planta se encuentra directamente relacionado con la acumulación de biomasa radicular. En este sentido, la presencia de compuestos de origen bacteriano podría influir en los procesos de división y elongación celular con la formación de tejido radicular más vigoroso. Esto se traduce en una mayor actividad metabólica y capacidad de absorción de agua/nutrientes (Jaffar *et al.*, 2023), lo que favorecería el incremento del peso fresco y seco de la radícula y explicaría el efecto observado en los tratamientos con SLC.

En este sentido, García-Bernal *et al.* (2022) reportaron un comportamiento similar al evaluar la aplicación de *Streptomyces* sp. RL8 durante la germinación *in vitro* de frijol Tépari (*P. acutifolius* Gray), donde las semillas tratadas presentaron un aumento en el peso fresco (*ca.* 347 mg) y seco (*ca.* 101 mg) de radícula, en comparación con las no inoculadas.

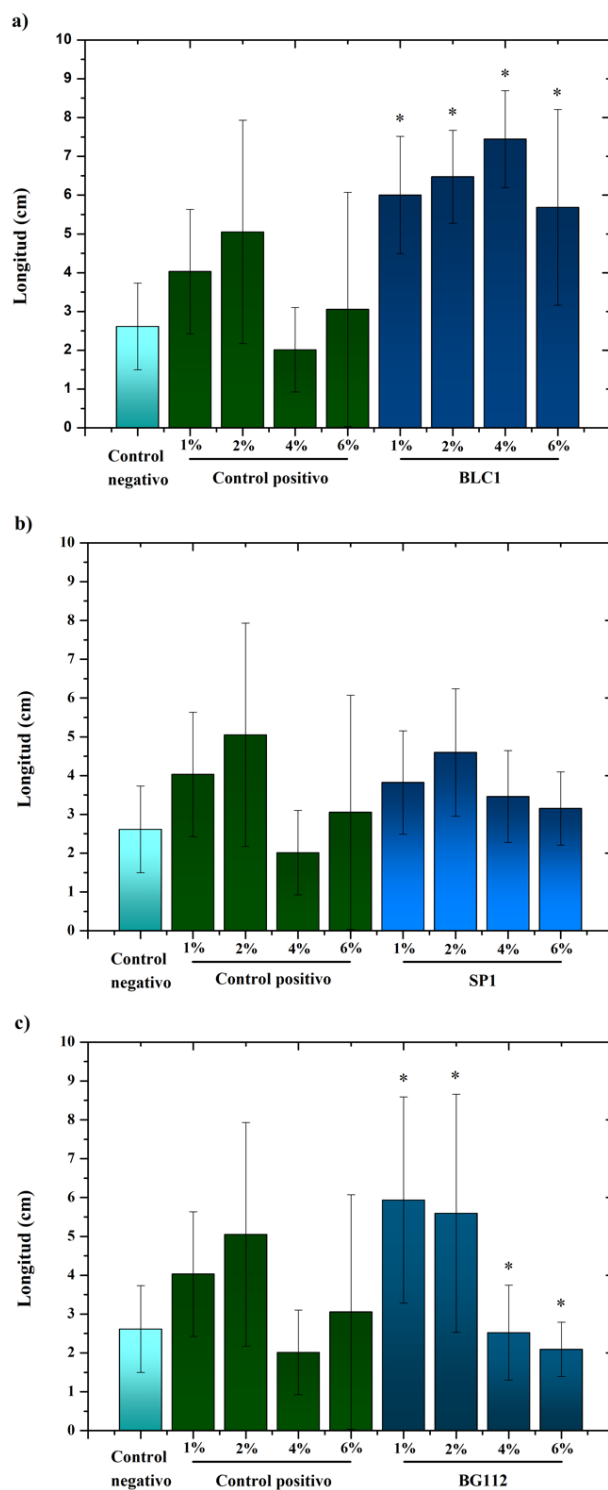


Figura 4. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre la longitud de radícula en frijol comba (*P. lunatus* L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo.

* indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.

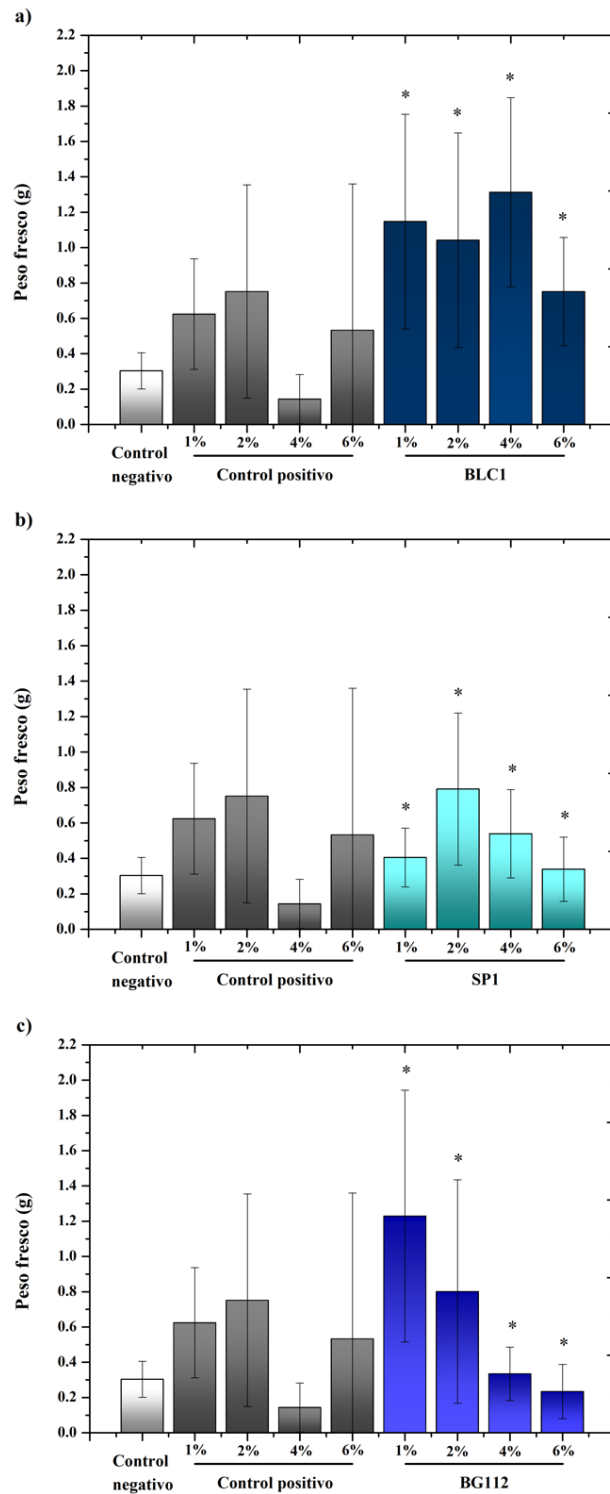


Figura 5. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el peso fresco de radícula en frijol comba (*P. lunatus* L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.

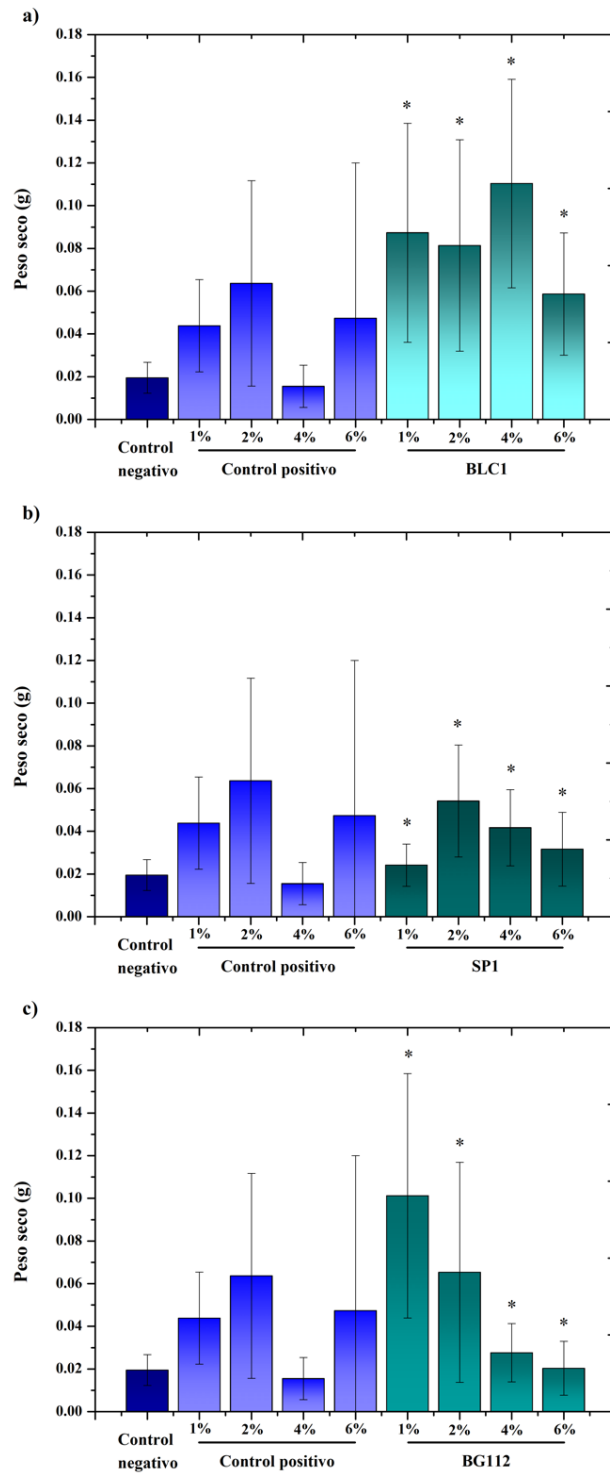


Figura 6. Efecto de postbióticos derivados de BAL sobre el peso seco de radícula en frijol comba (*P. lunatus* L.): a) BLC1, b) SP1 y c) BG112. Control negativo: agua; control positivo: medio de cultivo. * indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el SLC de cada bacteria y el control negativo.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación evidenció que los postbióticos derivados de las bacterias ácido-lácticas *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1, *L. rhamnosus* SP1 y *L. plantarum* BG112 favorecen la germinación del frijol comba (*P. lunatus* L.), presentando un efecto bioestimulante dependiente tanto de la cepa bacteriana como de la concentración aplicada (1, 2, 4 y 6% v/v).

En particular, el tratamiento derivado de *L. rhamnosus* SP1 al 4% (v/v) presentó el mayor porcentaje de germinación (70%), mostrando una interacción significativa en comparación con los controles evaluados. Por su parte, los parámetros de crecimiento inicial mostraron una respuesta más consistente con el tratamiento derivado de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 al 4% (v/v) el cual, con una interacción significativa, incrementó el índice de vigor de semilla-I (555.65), la longitud de radícula (7.44 cm), así como el peso fresco (1.31 g) y seco (0.11 g) de radícula. No se observó un efecto significativo entre los tratamientos evaluados en el TMG.

En conjunto, estos resultados sugieren que los postbióticos de *B. animalis* subsp. *lactis* BLC1 presentan el mayor potencial bioestimulante entre los tratamientos evaluados. Se recomienda que en futuras investigaciones se amplíe el rango de concentraciones evaluadas y se identifiquen los compuestos bioactivos responsables de los efectos observados, esto con el fin de optimizar su potencial aplicación en sistemas agrícolas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi-Khalaki, M., Ghorbani, A., & Dadjou, F. (2019). Influence of nano-priming on *Festuca ovina* seed germination and early seedling traits under drought stress, in laboratory condition. *Ecopersia*, 7(3), 133-139.
- Adebo, J.A. (2023). A Review on the potential food application of lima beans (*Phaseolus lunatus* L.), an underutilized crop. *Applied Sciences*, 13(3), 1996.
- Aguirre-García, Y.L., Cerda-Alvarez, N.C., Santiago-Santiago, R.M., Chantre-López, A.R., Rangel-Ortega, S.D.C., & Rodríguez-Herrera, R. (2025). The metabolites produced by lactic acid bacteria and their role in the microbiota–gut–brain axis. *Fermentation*, 11(7), 378.
- Akpogheli, P.O., Edo, G.I., Ali, A.B.M., Yousif, E., Zainulabdeen, K., Owheruo, J.O., Isoje, E.F., Igbuku, U.A., Essaghah, A.E.A., Makia, R.S., Ahmed, D.S., Umar, H., & Alamiery, A.A. (2025). Lactic acid bacteria: Nature, characterization, mode of action, products and applications. *Process Biochemistry*, 152, 1-28.
- Arinaitwe, U., Yabwalo, D.N., & Hangamaisho, A. (2025). Unlocking the potential of biostimulants: A review of classification, mode of action, formulations, efficacy, mechanisms, and recommendations for sustainable intensification. *International Journal of Plant Biology*, 16(4), 122.
- Ayivi, R.D., Gyawali, R., Krastanov, A., Aljaloud, S.O., Worku, M., Tahergorabi, R., Silva, R.C., & Ibrahim, S.A. (2020). Lactic acid bacteria: Food safety and human health applications. *Dairy*, 1(3), 202-232.
- Binda, S., Hill, C., Johansen, E., Obis, D., Pot, B., Sanders, M.E., Tremblay, A., & Ouwehand, A.C. (2020). Criteria to qualify microorganisms as “probiotic” in foods and dietary supplements. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1662.
- Chávez-García, S.N., Rodríguez-Herrera, R., Medrano-Macías, J., Nery-Flores, S., Silva-Belmares, S.Y., & Flores-Gallegos, A.C. (2024). Study of probiotics as biostimulants and biofortifiers in seed germination. *Fermentation*, 10(11), 538.
- Chen, Q., Song, Y., An, Y., Lu, Y., & Zhong, G. (2024). Mechanisms and impact of rhizosphere microbial metabolites on crop health, traits, and functional components: A comprehensive review. *Molecules*, 29(24), 5922.
- Chukwunyere, E.O., Chukwunyere, N.C., & Ekwefi, O.M. (2025). Ethnobotanical insights into lima bean (*Phaseolus lunatus*): Exploring its traditional uses, cultural significance, and educational value. *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*, 13(3), 166-174.

- Cruz, A., Venegas-Tarancón, S.G., Romano, F., Sendín, L.N., Hebert, E.M., Saavedra, M.L., & Filippone, M.P. (2022). Evaluación del efecto de bacterias lácticas como promotores de la germinación y crecimiento vegetal en cítricos. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 42(2), 63-74.
- Esquivel, M., Castiñeiras, L., & Hammer, K. (1990). Origin, classification, variation and distribution of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) in the light of Cuban material. *Euphytica*, 49, 89-97.
- Finch-Savage, W.E., & Bassel, G.W. (2016). Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567-591.
- García-Bernal, M., Medina-Marrero, R., Abasolo-Pacheco, F., Ojeda-Silvera, C.M., Arcos-Ortega, G.F., & Mazón-Suástegui, J.M. (2022). Efecto antifúngico de la cepa de *Streptomyces* sp. RL8 y su acción promotora en la germinación y crecimiento inicial del frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* Gray). *Terra Latinoamericana*, 40, e1067.
- Gavilan-Figari, I., Inga, M., Betalleluz-Pallardel, I., Espinoza de Arenas, L., & Comettant-Rabanal, R. (2024). Andean lima bean ecology and its potential contribution to food security. *Legume Science*, 6, e225.
- Gómez-Godínez, L.J., Aguirre-Noyola, J.L., Martínez-Romero, E., Arteaga-Garibay, R.I., Ireta-Moreno, J., & Ruvalcaba-Gómez, J.M. (2023). A look at plant-growth-promoting bacteria. *Plants*, 12(8), 1668.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G.R., Merenstein, D.J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R.B., Flint, H.J., Salminen, S., Calder, P.C., & Sanders, M.E. (2014). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11(8), 506-514.
- Jaffar, N.S., Jawan, R., & Chong, K.P. (2023). The potential of lactic acid bacteria in mediating the control of plant diseases and plant growth stimulation in crop production: A mini review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1047945.
- John, J.C., Kumar, S., & Ge, M. (2020). Probiotic prospects of PGPR for green and sustainable agriculture. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 53(19-20), 899-914.
- Kowalska, B., & Wrzodak, A. (2025). Application potential of lactic acid bacteria in horticultural production. *Sustainability*, 17(4), 1385.
- López-Alcocer, J.J., Lépez-Ildelfonso, R., González-Eguiarte, D.R., Rodríguez-Macías, R., & López-Alcocer, E. (2016). Morphological variability of wild *Phaseolus lunatus* L. from the western region of México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 49-58.

- López-Serna, R. (2022). Caracterización de una colección de entradas de *Phaseolus lunatus* para composición nutritiva. Universitat Politècnica de València.
- Ma, L., Tu, H., & Chen, T. (2023). Postbiotics in human health: A narrative review. *Nutrients*, 15(2), 291.
- Martínez-Castillo, J. (2023). El frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.) en América: características, origen e importancia de la especie. En Peralta-Idrovo, E., & Martínez-Castillo, J. (Eds.), *El fréjol torta o pallar Phaseolus lunatus L. en Ecuador*. INIFAP, CONAHCYT-CICY, RED LUNATUS. Quito, Ecuador. pp. 16-22.
- Martínez-Castillo, J., Andueza-Noh, R.H., & Chacón-Sánchez, M.I. (2015). Recent advances in the study of the evolution of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) in Mexico. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/297767033_Recent_advances_in_the_study_of_the_evolution_of_lima_bean_phaseolus_lunatus_l_in_mexico
- Martínez-Castillo J., Zizumbo-Villarreal, D., Perales-Rivera, H., & García-Marín, P.C. (2004). Intraspecific diversity and morpho-phenological variation in *Phaseolus lunatus* L. from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Economic Botany*, 58, 354-380.
- Menendez, E., & Garcia-Fraile, P. (2017). Plant probiotic bacteria: Solutions to feed the world. *AIMS Microbiology*, 3(3), 502-524.
- Meza, C., Fernandez-Barbero, A., Carrasco, B., Mesquita-Neto, J., & Banerjee, A. (2026). Exopolysaccharide-based microencapsulation of plant growth-promoting *Bacillus* strains improves germination, growth, and yield of Chilean common bean cultivars. *Legume Science*, 8(1), e70083.
- Meza, C., Valenzuela, F., Echeverría-Vega, A., Gómez, A., Sarkar, S., Cabeza, R.A., & Banerjee, A. (2022). Plant-growth-promoting bacteria from rhizosphere of Chilean common bean ecotype (*Phaseolus vulgaris* L.) supporting seed germination and growth against salinity stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1052263.
- Nambo-García, J.I. (2022). Caracterización físico-química y calidad de semilla de diferentes genotipos de comba (*Phaseolus lunatus*) de la Región de Tierra Caliente, Guerrero. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/48687>
- Narayanan, Z., & Glick, B.R. (2022). Secondary metabolites produced by plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microorganisms*, 10(10), 2008.
- Nataraj, B.H., Ali, S.A., Behare, P.V., & Yadav, H. (2020). Postbiotics-parabiotics: The new horizons in microbial biotherapy and functional foods. *Microbial Cell Factories*, 19, 168.

- Núñez, Y.O., Rocafull, Y.R., Rodríguez, Y.A., Roque, L.C.R., Rodríguez, Y.L., Moreno, L.D., Álvarez, M.E., Rodríguez, J., Zulueta, I., & Buides, J.A.F. (2021). Selección de cepas bacterianas con potencial estimulador del crecimiento vegetal en *Phaseolus vulgaris* L. (cv. 'Lewa'). *Agrotecnia de Cuba*, 45(1), 42-58.
- Padilha, M.S., Coelho, C.M.M., & Siega, Y.P. (2024). Phytase and alpha-amylase activity are positively associated with seed vigor in common bean seeds. *Revista Ciência Agronômica*, 55, e20238762.
- Pellegrini, M., Pagnani, G., Bernardi, M., Mattedi, A., Spera, D.M., & Gallo, M.D. (2020). Cell-free supernatants of plant growth-promoting bacteria: A review of their use as biostimulant and microbial biocontrol agents in sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(23), 9917.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Agronomy*, 10(2), 186.
- Ruiz-Aymá, G., Romero-Arguelles, R., Rios-Del Toro, E. E., Juarez-Gaspar, A., Olalla-Kerstupp, A., Loredó-Tovias, M., & Gómez-Govea, M.A. (2026). Postbiotic metabolites present in the supernatants of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Bacillus cereus* promote the germination and growth of *Hibiscus sabdariffa* and *Prosopis juliflora*. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1741549.
- Saccaram, C., Simonin, M., Boutet, S., Brosse, C., Peng, S., François, T., Collet, B., Perreau, F., Sourdeval, D., Marais, C., Barret, M., Rajjou, L., & Corso, M. (2025). Elucidating the interplay between metabolites and microorganisms in the spermosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. *mSystems*, 10(8), e00707-25.
- Salminen, S., Collado, M.C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E.M.M., Sanders, M.E., Shamir, R., Swann, J.R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(9), 649-667.
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., & Soleymani, A. (2024). The roles of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13(5), 613.
- Sunita, K., Mishra, I., Mishra, J., Prakash, J., & Arora, N.K. (2020). Secondary metabolites from halotolerant plant growth promoting rhizobacteria for ameliorating salinity stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 11, 567768.
- Vallejo-Cordoba, B., Castro-López, C., García, H.S., González-Córdova, A.F., & Hernández-Mendoza, A. (2020). Postbiotics and paraprobiotics: A review of current evidence and emerging trends. *Advances in Food and Nutrition Research*, 94, 1-34.

- Vizcarra-Manríquez, V.G. (2024). Análisis de diversidad genética de comba (*Phaseolus lunatus* L.) de la región de Tierra Caliente, Guerrero. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/50085>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J., Wang, Y., & Geng, W. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 612285.
- Yaghoubian, I., Msimbira, L.A., & Smith, D.L. (2022). Cell-free supernatant of *Bacillus* strains can improve seed vigor index of corn (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 857643.
- Zhang, Y., Xu, J., Li, R., Ge, Y., Li, Y., & Li, R. (2023). Plants' response to abiotic stress: Mechanisms and strategies. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 10915.
- Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C.M., Harris, H.M., Mattarelli, P., & Watanabe, K. (2020). Taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of Lactobacillaceae and Leuconostocaceae. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70, 2782-2858.