



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

***Bacillus subtilis* y *Trichoderma asperellum* (Ta13 17) EN EL
CRECIMIENTO DE CHILE DULCE (*Capsicum annuum* L.)**

TESIS REPOSITORIO

Que presenta:

Julio Jacobo Gamboa Angulo

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical

Director de tesis:

Dr. Arturo Reyes Ramírez

Conkal, Yucatán, México

Diciembre, 2024



TecNM



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México, a 05 de Diciembre de 2024

El comité de tesis del candidato a grado: Julio Jacobo Gamboa Angulo, constituido por los CC. Dr. Arturo Reyes Ramírez, Dra. Felicia Amalia Moo Koh, y Dr. Jairo Cristóbal Alejo, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: ***Bacillus subtilis* y *Trichoderma asperellum* (Ta13 17) EN EL CRECIMIENTO DE CHILE DULCE (*Capsicum annuum* L.)**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE

Dr. Arturo Reyes Ramírez
Director de Tesis

Dra. Felicia Amalia Moo Koh
Asesor de Tesis

Dr. Jairo Alejo Cristóbal
Asesor de Tesis



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México a 05 de Diciembre de 2024

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

Julio Jacobo Gamboa Angulo

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar expresando mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por fomentar la investigación científica en México a través de su programa de becas para estudiantes de posgrado. Asimismo agradezco a mi comité de tesis conformado por el Dr. Arturo Reyes Ramírez, Dra. Felicia Amalia Moo Koh y al Dr. Jairo Cristóbal Alejo y a los de la unidad Lol'ic cuya experiencia, paciencia y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su guía no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y superar los desafíos.

A mi familia, les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino. A mi hermana, a mi mejor amigo, su esposa y alguien muy especial que se encuentra en terapias por sus palabras de aliento, y mí por su presencia y cariño, gracias por ser mi pilar en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Al Tecnológico Nacional de México Campus Conkal, gracias por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Mi gratitud también va a la División de Estudios de Posgrado e Investigación, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de esta tesis. Aprecié profundamente su confianza en mi trabajo y el ambiente de aprendizaje que me ofrecieron.

A mis amigos y compañeros del posgrado, gracias por su compañía y apoyo en los momentos de estrés y alegría. Ustedes fueron mi red de contención y su amistad me ayudó a mantener el ánimo en los momentos más duros. Cada uno de ustedes contribuyó a que este proceso fuera más llevadero y significativo.

DEDICATORIA

Dedico mi tesis principalmente a mi comité, por darme su apoyo y conocimientos necesarios para culminar esta meta.

A mis padres, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.

También a mis hermanas, por brindarme su apoyo moral en esas noches que tocaba investigar.

A mi mejor amigo de la infancia, a su esposa y a una persona muy especial a quien considero mi alma gemela.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CAPITULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MARCO TEÓRICO	3
1.2.1 Importancia del chile	3
1.2.2 Manejo del cultivo de chile.....	3
1.2.3 Importancia de los inoculantes microbianos.....	5
1.2.4. Producción de ácido indolacético.....	5
1.2.5 <i>Bacillus subtilis</i> como promotor de crecimiento vegetal	6
1.2.5.1 <i>Bacillus</i> como productor de ácido indolacético (AIA)	7
1.2.5.2 Capacidad endófito de <i>Bacillus</i>	8
1.2.5.3. <i>Bacillus</i> como antagonista contra fitopatógenos	9
1.2.6. <i>Trichoderma asperellum</i> como promotor de crecimiento vegetal	10
1.2.6.1. Producción de AIA de <i>Trichoderma</i> spp.	11
1.2.6.2. Capacidad endófito del <i>Trichoderma</i>	12
1.2.6.3. <i>Trichoderma</i> como antagonismo contra fitopatógenos.....	13
1.3 HIPÓTESIS.....	15
1.4 OBJETIVOS.....	16

1.4.1 Objetivo general	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
1.5 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	17
1.6 REFERENCIAS	18

RESUMEN

El chile dulce es una hortaliza que se consume en la península de Yucatán. El mal uso de agroquímicos es una de las principales causas de las perturbaciones en el ambiente, y la resistencia a plagas en los cultivos. Una alternativa es el uso de inoculantes microbianos que son amigables con el ambiente, entre estos están *Bacillus subtilis* y *Trichoderma asperellum* que son antagonistas de hongos fitopatógenos como *Corynespora cassiicola* y *Fusarium equiseti*, estos microorganismos PCV tienen una relación simbiótica con las plantas estimulando la emergencia de semillas, el crecimiento vegetal, el incremento de biomasa, mejorando la calidad de las plántulas por la producción de auxinas estimulantes como el ácido indolacético un derivado del L-triptófano. El objetivo de este proyecto fue evaluar la confrontación dual *in vitro* de *B. subtilis* (F8 y M9) y *T. asperellum* (Ta13-17) contra los hongos fitopatógenos *C. cassiicola* (ITC23) y *F. equiseti* (FCHE), así como determinar la producción de AIA de los inoculantes con el reactivo Salkowski, para las variables de emergencia, crecimiento, biomasa (fresca y seca) y calidad de plántula se aplicaron 8 tratamientos, inoculación individual, combinación, un consorcio y un testigo sin inocular. En los resultados se observaron que las confrontaciones dual *in vitro* las cepas inhibieron el crecimiento de los fitopatógenos de *C. cassiicola* y *F. equiseti* a los 5 días hasta 67 %. Se determinó que las 3 cepas evaluadas producen AIA. En el porcentaje de emergencia *T. asperellum* mostró un aumento del 11 % de semillas emergidas en relación a semillas no inoculadas, así como en el coeficiente de velocidad todos los tratamientos superaron al testigo. Los tratamientos inoculados aumentaron la altura de las plántulas superando al testigo. La combinación de *T. asperellum* con *B. subtilis* mostraron mayor diámetro del tallo. De forma general la inoculación de las cepas microbianas afectó a la biomasa y presentó un índice de calidad mayor al testigo. Las cepas de *B. subtilis* (F8 y M9) mostraron capacidad endófito colonizando los tallos de chile dulce. Los resultados obtenidos muestran que *T. asperellum* y *B. subtilis* tiene potencial de inhibición, producción de AIA, así como en la emergencia de semillas, el crecimiento de plántulas y aumenta la calidad de chile dulce.

Palabras clave: Inoculación, antagonismo, ácido indol acético, índice de calidad.

ABSTRACT

Sweet chili is a vegetable consumed in the Yucatan Peninsula. The misuse of agrochemicals is one of the main causes of environmental disturbances and pest resistance in crops. An alternative is the use of microbial inoculants that are environmentally friendly, among these are *Bacillus subtilis* and *Trichoderma asperellum* that are antagonists of phytopathogenic fungi such as *Corynespora cassiicola* and *Fusarium equiseti*, these PGP microorganisms have a symbiotic relationship with plants stimulating seed emergence, plant growth, biomass increase, improving seedling quality by the production of auxin stimulants such as indolacetic acid, a derivative of L-tryptophan. The objective of this project was to evaluate the dual *in vitro* confrontation of *B. subtilis* (F8 and M9) and *T. asperellum* (Ta13-17) against the phytopathogenic fungi *C. cassiicola* (ITC23) and *F. equiseti* (FCHE), as well as determining the AIA production of the inoculants with the Salkowski reagent, for the variables of emergence, growth, biomass (fresh and dry) and seedling quality, 8 treatments were applied, individual inoculation, combination, a consortium and a control without inoculation. The results showed that the dual *in vitro* confrontations of the strains inhibited the growth of *C. cassiicola* and *F. equiseti* phytopathogens at 5 days up to 67 %. It was determined that the 3 strains evaluated produce AIA. In the percentage of emergence, *T. asperellum* showed an increase of 11 % of emerged seeds in relation to non-inoculated seeds, as well as in the speed coefficient, all treatments outperformed the control. The inoculated treatments increased the height of the seedlings and outperformed the control. The combination of *T. asperellum* with *B. subtilis* showed greater stem diameter. In general, the inoculation of the microbial strains affected the biomass and presented a higher quality index than the control. The strains of *B. subtilis* (F8 and M9) showed endophytic capacity colonizing sweet chili stems. The results obtained show that *T. asperellum* and *B. subtilis* have potential for inhibition, AIA production, as well as seed emergence, seedling growth and increased quality of sweet chili.

Key words: Inoculation, antagonism, indole acetic acid, quality index.

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum*) es la especie vegetal cultivada de mayor importancia a nivel mundial debido a la escala de su cultivo y al valor económico de su rendimiento (Pérez *et al.*, 2015; Casas *et al.*, 2019). México es considerado el centro de origen del chile (*C. annuum* L.); Fue domesticado en Centroamérica, desde donde se extendió a muchos lugares con muchas variedades diferentes. *C. annuum* es la especie de chile más consumida en el país (López *et al.*, 2019). En la Península de Yucatán la variedad de chiles es muy apreciada y tiene alto valor culinario en la cocina tradicional (Gamboa *et al.*, 2020).

Se utilizan fertilizantes químicos para aumentar el rendimiento del chile dulce, pero estos agentes causan algunos daños ambientales, como cambios en el pH del suelo, degradación de la estructura del suelo, pérdida de nutrientes y ecosistemas y contaminación del agua (Thilagar *et al.*, 2018; González, 2019; Chen *et al.*, 2023). Este problema ha motivado la búsqueda de alternativas y nuevas estrategias de manejo de nutrientes vegetales encaminadas a reducir el uso y utilización de fertilizantes químicos, dentro de dichas estrategias se incluye el uso de inoculantes microbianos (Yuan *et al.*, 2017; Passari *et al.*, 2018; Verma *et al.*, 2020).

Los inoculantes microbianos son microorganismos que pueden introducirse en la zona de las raíces y afectar el crecimiento y el rendimiento de las plantas a través de una variedad de mecanismos, como el aumento de la fertilidad del suelo y la promoción de minerales, como la fijación de nitrógeno y la solubilización de fosfato que mejora el crecimiento de las plantas al aumentar su viabilidad, ya que promueve la resistencia a fitopatógenos (Reyes *et al.*, 2014; Passari *et al.*, 2018; Chowdhury *et al.*, 2020).

Los organismos promotores de crecimiento vegetal más comunes incluyen bacterias del género *Bacillus* y hongos *Trichoderma*, los cuales son considerados importantes en la agricultura sustentable, ya que su principal característica es estimular el crecimiento de las plantas y producir resistencia a diferentes tipos de estrés (hídrico, salino y biótico). Los organismos promotores de crecimiento son productores de fitohormonas naturales, como el ácido indol-3-acético, son capaces de colonizar las raíces y tallos de las plantas hospedantes, además de producir diversos metabolitos secundarios con propiedades antagónicas, lo que constituye una alternativa de control biológico y reduce la posibilidad de desarrollar resistencia a fitopatógenos (Guigón *et al.*, 2019; Hyder *et al.*, 2020; León *et al.*, 2022).

Se ha reportado que el uso de *Bacillus* y *Trichoderma* en chile Xcat'ik (*Capsicum annuum* L.) mejoró los paramétricos de crecimiento en la planta que son la altura, diámetro del tallo y la biomasa de la raíz (Gamboa *et al.*, 2020), Celis *et al.* (2023) y Monteiro *et al.* (2023) reportaron que el uso de *Trichoderma* y *Bacillus* inhibieron el crecimiento micelial de *Corynespora cassiicola* y aumentaron el crecimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de tres promotores de crecimiento vegetal microbianos (PGVM) y su combinación sobre los parámetros de crecimiento de *C. annuum* L. en condiciones protegidas.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Importancia del chile

Los chiles con alta demanda comercial por color, aroma, tamaño, sabor o picante: *Capsicum chinense*, *C. baccatum*, *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. annuum*. Sin embargo, este último es el más valioso a nivel mundial y por ello se cultiva en regiones templadas, tropicales y subtropicales (Domínguez *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2018). Los chiles son un producto hortícola apreciados en la cocina y la agroindustria de muchos países, aunque los principales mercados son Estados Unidos, Países bajos, Rusia, Turquía y Emiratos árabes unidos donde su consumo es de al menos en estados unidos es de 5 kg per cápita en 2020 y el consumo mundial en fresco creció un 6 % (SAGARPA-SIAP, 2023). En México su valor culturalmente se ha convertido en un símbolo de identidad nacional e internacional, debido a su consumo como especia y alimento nutritivo (Serrano *et al.*, 2022). El primer productor mundial de chile es China, con 16 810. 52 t de chile cosechados en una superficie de poco más de 757 377 ha, mientras que México ocupa el segundo lugar con 3 069 856.79 t de chile cosechadas en una superficie de 173 134.31 ha, lo que representa el 8.41 % del área total de cultivo de esta solanácea (SAGARPA-SIAP, 2023).

1.2.2 Manejo del cultivo de chile

Los modelos de producción agrícola intensiva a nivel global tienen como objetivo mejorar la productividad mediante el uso de insumos agrícolas como fertilizantes de síntesis química, pesticidas y herbicidas, aunque los productos de síntesis química tienen consecuencias perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Los costos aumentan la productividad durante los primeros años de uso (Reyes *et al.*, 2014; Calderan, 2019; Natsiopolos *et al.*, 2022). Cada vez está más clara la importancia de los microorganismos en la naturaleza y su relación con el ser humano. Cuando es necesario implementar medidas de protección en la

agricultura, los microorganismos utilizados como promotores de crecimiento vegetal microbianos (PGVM) juegan un papel importante (Amaresan *et al.*, 2012).

El desarrollo y uso de microorganismos se considera una alternativa importante a la sustitución parcial o total de los fertilizantes minerales. Los inoculantes microbianos son microorganismos que, tras ser inoculados, pueden vivir juntos o en simbiosis con las plantas y contribuir a proporcionarles nutrición y protección. Estos microorganismos se encuentran naturalmente en el suelo e incluyen muchos grupos diferentes; Sin embargo, sus poblaciones se ven afectadas por un mal manejo del suelo y un uso excesivo de agroquímicos (Peña *et al.*, 2016; Liotti *et al.*, 2019; Helal *et al.*, 2022).

En la agricultura tradicional se toma en cuenta los costos de los insumos agrícolas y su dependencia de sus variables internacionales, así como su impacto sobre el medio ambiente que es perjudicial cuando su uso es excesivo y descontrolado en cultivos agrícolas. Los efectos al medio ambiente son negativos como pérdida de nutrientes y microfauna, el uso de microorganismos que promueven el crecimiento vegetal y la resistencia a condiciones abióticas (clima y suelo) y bióticas (virus y hongos), estas incluyen bacterias y hongos benéficos asociados o simbiosis con raíces de plantas (Patel *et al.*, 2017; Pedraza *et al.*, 2010).

Los microorganismos promotores de crecimiento vegetal mejoran el crecimiento y el rendimiento de las plantas, en especial cuando se inoculan y estas promueven el crecimiento y ayudan a fijar los nutrientes esenciales. La materia orgánica que ha sido inoculada aumenta el contenido nutricional del suelo, en especial el nitrógeno, fósforo y potasio, así como su actividad antimicrobiana, mejorando la protección de las plantas contra fitopatógenos y las enfermedades que causan (Liu *et al.*, 2014).

1.2.3 Importancia de los inoculantes microbianos

Los microorganismos pueden estimular el crecimiento de las plantas, se ha registrado entre estos las bacterias y los hongos micorrízicos, que son fijadores de nitrógeno de vida libre y tienen un efecto directo sobre la nutrición de las plantas, desempeñando un papel esencial como biofertilizantes que promueven un mejor crecimiento de los cultivos (Gamboa *et al.*, 2020). Representan alternativas en la producción agrícola sostenible por ser tecnologías amigables con los ecosistemas agrícolas.

Entre los factores considerados importantes para el crecimiento de las plantas, están la exportación y producción de fitohormonas reguladoras del crecimiento como auxinas, citoquininas, etileno, ácido abscísico y giberelina, las cuales se consideran efectos secundarios de esta interacción (Reyes *et al.*, 2014). También, los microorganismos mejoran la absorción de agua, nitrógeno (N) y otros nutrientes, y producen mecanismos de defensa de las plantas contra fitopatógenos y procesos biológicos, dichos procesos vienen siendo estudiados para evaluar el uso potencial de microorganismos en diferentes cultivos hortícolas (Amaresan *et al.*, 2012).

1.2.4. Producción de ácido indolacético

El ácido 3-indol acético (AIA) es una auxina que regula el desarrollo de las plantas, desde el crecimiento, la división celular y la formación de raíces, es el más conocido a nivel vegetal y producido naturalmente (Castillo *et al.*, 2005; Marquina *et al.*, 2018). El AIA provoca deformación y expansión de los pelos radicales, facilitando una mayor absorción de nutrientes, promoviendo el crecimiento y rendimiento de las plantas (Alcántara *et al.*, 2019). Sin embargo, existen otros tipos de compuestos conocidos como auxinas sintéticas, como el ácido indolbutírico (IBA), el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y el ácido α -naftalenoacético (NAA), de los cuales tienen

propiedades similares a los efectos del AIA y se utiliza en prácticas agrícolas en lugar de AIA (Alcántara *et al.*, 2019).

Microorganismos considerados como promotores del crecimiento vegetal (PCV), se ha visto asociados a las raíces de las plantas, tales como bacterias y hongos que viven en el entorno de las raíces y tienen un impacto positivo en el crecimiento de las plantas a través de diversos mecanismos directos e indirectos como la producción de AIA (Castillo *et al.*, 2005).

1.2.5 *Bacillus subtilis* como promotor de crecimiento vegetal

Bacillus es una bacteria cosmopolita ampliamente distribuida en la naturaleza debido a su capacidad de producir endosporas, que le confieren resistencia y mayor adaptación en muchos ambientes, tanto acuáticos como terrestres. Son facultativamente aeróbicos y anaeróbicos, y pueden utilizar una amplia gama de materia orgánica presente en el suelo (Corrales *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2019; Mao *et al.*, 2020).

Las bacterias pertenecientes al género *Bacillus* provocan una estimulación directa o indirecta del crecimiento de las plantas. La forma directa es la estimulación del crecimiento de las plantas, observada en las bacterias de la rizósfera, que fijan biológicamente nitrógeno, solubilizan minerales como el fósforo y producen hormonas que regulan el crecimiento de las plantas, como el ácido indol-3-acético (AIA). A su vez, una forma indirecta de estimulación del crecimiento de las plantas implica la producción de sustancias que antagonizan a los patógenos o inducen resistencia a los medicamentos en las plantas, *B. subtilis* produce una gran cantidad de compuestos antibacterianos y promotores del crecimiento de las plantas (Tejera *et al.*, 2011; Corrales *et al.*, 2017).

Las comunidades bacterianas son particularmente sensibles a la fertilidad del suelo y a los exudados de las raíces de las plantas, variando según la fenología y el genotipo de la planta, por lo que las bacterias interactúan con las plantas y expresan procesos asociados, endógenos o simbióticos para adaptarse a las condiciones de la rizósfera y se consideran potenciales inoculantes microbianos, (Ragazzo *et al.*, 2011; Villarreal *et al.*, 2018).

En la promoción de crecimiento se reportó que los tratamientos con *B. subtilis* M9 no afectó la altura de la planta en chile habanero (*C. chinense*), pero en el diámetro del tallo, peso fresco y volumen de raíz de las plantas incrementaron con respecto al testigo (Samaniego *et al.*, 2016).

1.2.5.1 *Bacillus* como productor de ácido indolacético (AIA)

Las bacterias de la rizósfera tienen especial importancia en la relación suelo-planta y son responsables del incremento o disminución de los nutrientes, así como la producción de fitohormonas; las bacterias pertenecientes al género *Bacillus*, se destacan por su potencial como biofertilizantes e inciden ampliamente en el rendimiento y en la calidad de los cultivos (Mantilla *et al.*, 2011). Sosa *et al.* (2019) reportaron que cinco cepas de *Bacillus* spp. cultivadas en medios de cultivo suplementado con triptófano producen AIA entre 4.84 y 8.59 $\mu\text{g mL}^{-1}$. El AIA es la auxina conocida como ácido indolacético (AIA), induce a la formación y crecimiento de pelos radiculares, logrando una mayor captación de nutrientes y promoviendo el crecimiento de las plantas. Estos juegan un papel fundamental permitiendo la disminución de los fertilizantes químicos y reducir la contaminación al medio ambiente (Vega *et al.*, 2016).

Bautista *et al.* (2022) describieron las cepas de *Bacillus* que producen AIA que han sido reportadas tienen la capacidad de promover el crecimiento vegetal.

1.2.5.2 Capacidad endófitica de *Bacillus*

Los microorganismos endofíticos se definen como microorganismos que se encuentran en la superficie y en los tejidos de las plantas, no tienen efectos nocivos sobre las plantas, apoyan directamente el crecimiento de las plantas y eliminan contaminantes, solubilizan el fósforo, fijan el nitrógeno y también pueden usarse indirectamente para crear antagonistas para combatir patógenos vegetales o inducir mecanismos de resistencia, se encuentran en los espacios intracelulares y tejidos vasculares de tallos y raíces (Pérez *et al.*, 2018; Radillo *et al.*, 2019). Las interacciones entre el género *Bacillus* y los hábitats (suelo, agua y aire) ocurren directa o indirectamente lo que lo posiciona como un organismo predominante que han sido aislados en la rizósfera y que puede estar de manera endófitica en la planta (Mendoza *et al.*, 2014).

Esta conexión planta-endofítica crea un sistema en el que los microorganismos interactúan con las plantas y, a su vez, las bacterias se asocian con las plantas en formas endofíticas, patógenas y epífitas; Muchos de ellos forman relaciones simbióticas con plantas pertenecientes a diferentes grupos filogenéticos en los cuales se reportan efectos benéficos de bacterias del género *Bacillus* para aumentar el índice de germinación de semillas (Liu *et al.*, 2014; Doncel *et al.*, 2016).

Las bacterias rizosféricas suelen intercambiar señales moleculares con las plantas hospedadoras a nivel molecular, que confiere diversos mecanismos de adaptación y colonización (Velasco *et al.*, 2019). Un estudio demostró que la inoculación *in vitro* de bacterias endofíticas del género *Bacillus* favorecen la germinación y el crecimiento, además, la solubilización de fosfato, fijación de nitrógeno y producción de AIA en brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) y la lechuga (*Lactuca sativa*) (Acurio *et al.*, 2020).

1.2.5.3. *Bacillus* como antagonista contra fitopatógenos

Existen muchos tipos de microorganismos en la microflora del suelo, incluida una mezcla de actinomicetos, hongos, bacterias, protozoos, principalmente en la rizósfera, porque es fisiológicamente más activa en grupos específicos de hongos y bacterias; efecto antagonista contra hongos fitopatógenos del suelo; esta es una acción que puede usarse como forma de control biológico de fitopatógenos (Castillo *et al.*, 2015).

El uso de microorganismos para el control biológico de fitopatógenos en plantas es una alternativa práctica y ecológica que contribuye al desarrollo de la agricultura sustentable porque reduce los efectos nocivos de los productos químicos. Los agentes de control biológico de mayor estudio son bacterias de los géneros *Streptomyces*, *Pseudomonas*, *Agrobacteria* y *Bacillus* (Pozo *et al.*, 2006).

El género *Bacillus* es uno de los géneros más utilizados en este sentido, debido a su alta flexibilidad metabólica y capacidad de producir metabolitos contra fitopatógenos (Tejera *et al.*, 2011). *Bacillus* sp. debido a su adaptabilidad, tienen el potencial de exhibir actividad antagónica mediante competencia, producción de antibióticos y enzimas degradantes como la quitinasa, utilizada para combatir patógenos del suelo y raíz (Ruiz *et al.*, 2014).

El informe presentado por Monteiro *et al.* (2023) sobre la actividad *in vitro* de bacterias antagonistas del género *Bacillus* que inhibieron un total del 68.9 % del crecimiento de *C. cassicola*.

Liu *et al.* (2014) presentaron un informe sobre la actividad antagónica de dos cepas de *B. subtilis* (AR12 y SM21) y una de *Chryseobacterium* sp. R89 contra *Ralstonia solanacearum*, con el que inhibieron un total de 96.46 % en raíz de pimiento morrón.

Reyes *et al.* (2024) presentaron un informe sobre la actividad antagónica de *B. subtilis* y *T. harzianum* siendo la cepa de *B. subtilis* fue en el que se observó una mayor inhibición contra *F. oxysporum* con un 72.7 %.

1.2.6. *Trichoderma asperellum* como promotor de crecimiento vegetal

La especie *Trichoderma asperellum* es un hongo anaeróbico facultativo que se presenta naturalmente en una variedad de hábitats, principalmente aquellos que contienen materia orgánica en descomposición o desechos vegetales con un pH que varía de neutro a ácido neutro (Mao *et al.*, 2020; León *et al.*, 2022). Sus propiedades ayudan a mejorar el crecimiento de muchos cultivos, ya que es un hongo ampliamente distribuido en la rizósfera. Este hongo se utiliza para combatir enfermedades de las plantas causadas por hongos en el suelo y su efectividad se debe a su capacidad para colonizar y producir grandes cantidades de metabolitos antibacterianos. *T. asperellum* es conocido por sus capacidades antifúngicas y promotoras del crecimiento de las plantas (Ríos, 2014).

En un estudio de *Capsicum annuum* cv. Surajmukhi, la inoculación de *T. asperellum* y *T. harzianum* mejoraron el crecimiento de las plantas, como el peso fresco y seco de los brotes, el peso fresco y seco de las hojas, el peso fresco y seco de las raíces, el número de hojas, la altura de la planta y el índice foliar (Yadav *et al.*, 2023).

En un estudio de Chile Catiknifap (*Capsicum annuum* L.) reportaron que el uso de *Trichoderma* spp. afectó la biomasa aérea y biomasa raíz de las plantas en comparación (Basto *et al.* 2023).

Miranda (2022) reportó que la inoculación de *Trichoderma* en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) aumentaron la altura en comparación a plántulas sin inocular.

1.2.6.1. Producción de AIA de *Trichoderma* spp.

El género de hongos *Trichoderma* es crucial para la vida humana y el funcionamiento de los ecosistemas, ya que descompone la materia orgánica y juega un papel importante en el reciclaje de nutrientes en el medio ambiente. Algunos miembros de este género tienen simbiosis con leguminosas, pastos, plantas y solanáceas. Algunos de ellos se utilizan para el control biológico de patógenos vegetales como *Fusarium* y *Rhizoctonia*, así como para la producción de pigmentos de antraquinona y metabolitos secundarios como antibióticos y estimulantes del crecimiento vegetal (Ortuño *et al.*, 2013).

Entre los metabolitos secundarios que produce *Trichoderma* spp. está el ácido indol acético (AIA) que es una auxina estimulante del crecimiento vegetal que se ha estudiado mediante la producción de aminoácidos inductores de hormonas específicos, como el L-triptófano, los inóculos de *Trichoderma* spp. puede aumentar la tasa de germinación y reducir la exposición a estrés ambiental, resistencia a patógenos y aumento en las características morfológicas de las plantas (altura y raíz), así como su biomasa (Villamarín *et al.*, 2020; Suarez *et al.*, 2023).

López *et al.* (2022) informaron diferencias en la producción de AIA por cepas de *Trichoderma* spp., produciendo 9.0 y 35.3 $\mu\text{g mL}^{-1}$. También Valenzuela *et al.* (2022) reportaron diferencias en la producción de AIA por cepas de *Trichoderma* spp. produciendo 10.4 $\mu\text{g mL}^{-1}$ y 9.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente.

1.2.6.2. Capacidad endófitica del *Trichoderma*

La relación entre los hongos endófitos y su planta hospedera puede ser desde el mutualismo hasta la patogénesis. Esta relación entre ambos organismos puede producir metabolitos secundarios potencialmente tóxicos para patógenos de la planta. Siendo una alternativa para el control biológico el uso de hongos del género *Trichoderma* con capacidad endófitica, ya que son capaces de colonizar los tejidos de las plantas sin causar síntomas visibles e inducir la producción de compuestos relacionados con la defensa implicados en respuesta de las plantas a factores bióticos y abióticos (Sánchez *et al.*, 2013).

El hongo endófito produce factores virulentos fitotóxicos, mientras que la planta produce defensas, tanto mecánicas como bioquímicas. En consecuencia, ambos organismos para que coexistan se estable entre ellos una relación antagónica balanceada, que depende de la virulencia del hongo y las defensas de la planta, las cuales varían y son influenciadas por factores abióticos y por la etapa de desarrollo de ambos organismos (Camacho *et al.*, 2022). Cuando la virulencia del hongo y las defensas de la planta se equilibran se establece una relación endofítica, y por el contrario, cuando se presenta la senescencia del hospedero o se encuentra bajo estrés, este balance se torna a favor del hongo y este se expresa como patógeno, presentando los síntomas de la enfermedad (Pincay *et al.*, 2021).

Morel *et al.* (2021) reportaron que la inoculación de *Trichoderma* spp. presentó un porcentaje de colonización de un 80% en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L). Otros estudios con *Trichoderma* spp. como el de Celis *et al.* (2023) reportaron que el uso de *Trichoderma asperellum* en plantas de tomate promueven el crecimiento en las variables de altura de la planta, diámetro de tallo, número de hojas y biomasa seca, así como presento menos porcentaje de severidad contra *C. cassiicola*.

Otra especie reportada por Bader *et al.* (2020) es la especie de *Trichoderma harzianum* en plantas de pimienta promovieron el rápido aumento de biomasa aérea y raíz.

1.2.6.3. *Trichoderma* como antagonismo contra fitopatógenos

Los principales microorganismos endófitos utilizados como agentes de control biológico incluyen hongos del género *Trichoderma*, que se considera que tienen propiedades altamente antagonicas contra patógenos vegetales y son ampliamente utilizados en la agricultura sostenible. Tienen un gran potencial para el control biológico de plagas, enfermedades y contribuye al mejoramiento de cultivos (Leon *et al.*, 2018).

Por otro lado, los efectos antagonicos de *Trichoderma* son muy diferentes: estos antagonistas provocan resistencias sistémicas o locales, aumentando la tasa de crecimiento y la absorción de nutrientes de la planta. Cuando un antagonista entra en contacto físico con un fitopatógeno, sus hifas lo envolverán o se adherirán a él. La estructura especializada, el parasitismo fúngico, los antibióticos y la competencia por el espacio y los nutrientes son los principales mecanismos de acción de este hongo (Osuna *et al.*, 2018).

El uso de antagonistas biológicos para prevenir o controlar enfermedades de las plantas, siendo algunos autores que sugieren que el parasitismo fúngico es el principal mecanismo de acción de *Trichoderma*, mediante el cual ataca a las células patógenas, provoca daños generalizados, es una alternativa que ha demostrado ser efectiva sobre una gran escala del control biológico (Romero *et al.*, 2016).

Andrade *et al.* (2019) reportaron en la confrontación dual *in vitro* de *T. viride* contra *Rhizoctonia solani* obtuvieron un crecimiento del antagonista de 75 % y del patógeno 12 %, los resultados de crecimiento por parte del antagonista fueron mayor en comparación con el patógeno.

Martínez *et al.* (2022) presentaron un informe sobre la actividad antagónica de *T. erinaceum* inhibió el crecimiento micelial de *F. oxysporum* en un 90.5 %, mientras que el *T. virens* inhibió el crecimiento del micelio de *C. cassiicola* en un 75.1 %, mostrando su eficiencia contra estos fitopatógenos.

Vargas *et al.* (2015) reportaron la actividad antagónica de *Trichoderma asperellum* contra dos cepas de *Fusarium* sp. en la parte del tallo y raíz de plantas de tomate, presentaron una disminución del antagonista en 40 y 60 %. Celis *et al.* (2021) reportaron sobre la eficiencia de *T. asperellum* inhibiendo el crecimiento micelial de *F. equiseti* en un 63.2 % y *C. cassiicola* en un 55 %.

1.3 HIPÓTESIS

Las cepas *Bacillus subtilis* (F8 y M9) y *Trichoderma asperellum* (Ta13-17) son promotores de crecimiento vegetal, por lo tanto, la aplicación en combinación de *B. subtilis* y *T. asperellm* en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) mejora el crecimiento vegetal en relación a su inoculación individual.

1.4 OBJETIVOS

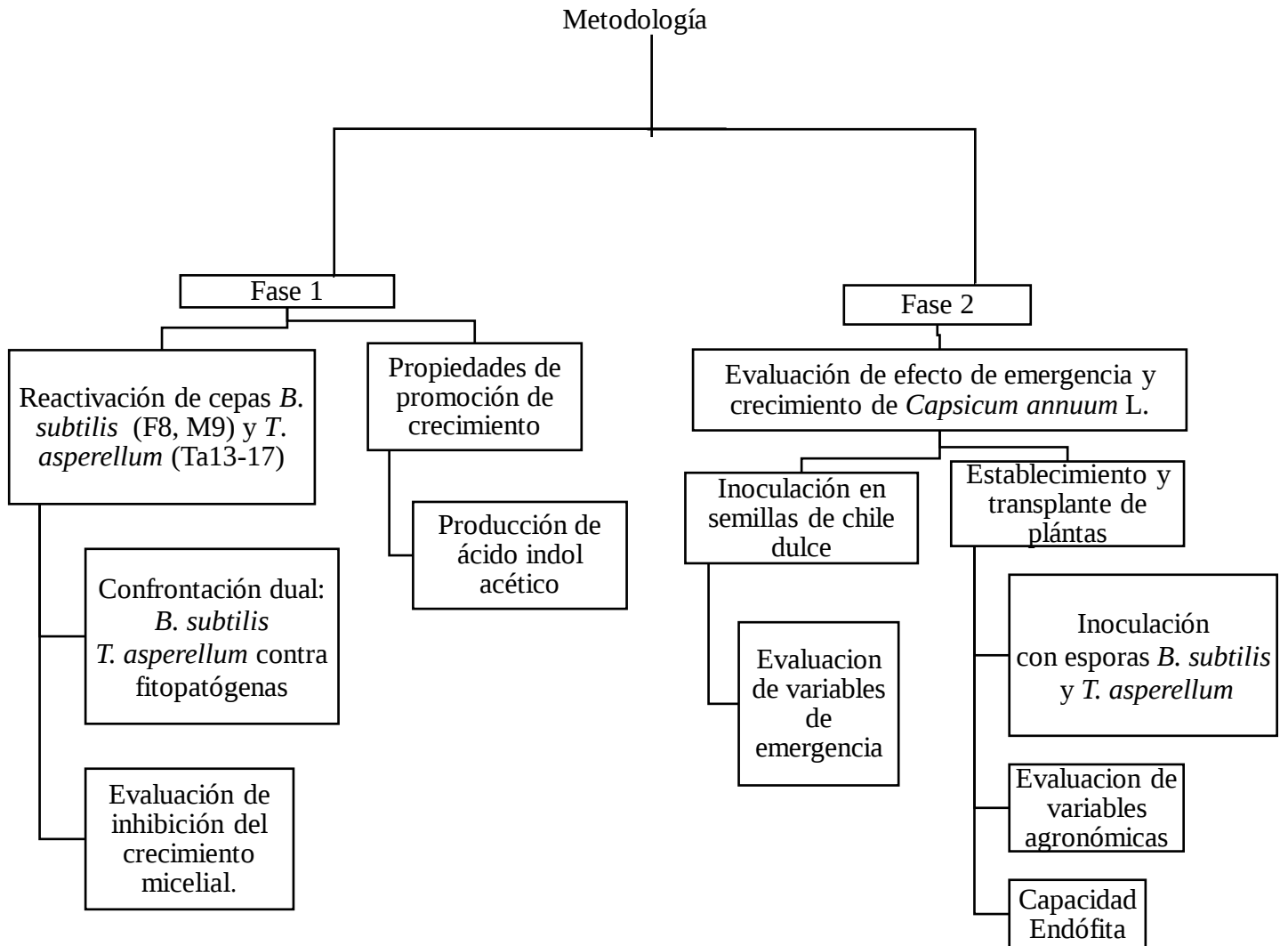
1.4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de los inoculantes *Bacillus subtilis* (F8 y M9) y *Trichoderma asperellum* (Ta13-17) en el crecimiento de plantas de chile dulce.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar la producción de ácido indol acético y la capacidad antagónica de *B. subtilis* (F8 y M9) y *T. asperellum* (Ta13-17) contra *Corynespora Cassiicola* (ITC23) y *Fusarium equiseti* (FCHE).
2. Evaluar el efecto de *B. subtilis* (F8 y M9), *T. asperellum* (Ta13-17) y su combinación en la emergencia y crecimiento de *Capsicum annuum* L.
3. Evaluar la capacidad endófito de *B. subtilis* (F8 y M9) y *T. asperellum* (Ta13-17) en chile dulce.

1.5 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL



1.6 REFERENCIAS

- Acurio-Vásconez RD, Mamarandi-Mossot JE, Ojeda-Shagñay AG, Tenorio EM, Chiluisa-Utreras VP, Vaca-Suquillo IDLÁ. 2020. Evaluación de *Bacillus* spp. como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) en brócoli (*Brassica oleracea* var. italica) y lechuga (*Lactuca sativa*). Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 21(3): 1-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1465
- Alcántara-Cortes JS, Acero-Godoy J, Alcántara-Cortés JD, Sánchez-Mora RM. 2019. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. Nova, 17(32): 109-129. <https://doi.org/10.25058/24629448.3639>
- Amaresan N, Jayakumar V, Kumar K, Thajuddin N. 2012. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria and their effect on tomato (*Lycopersicon esculentum*) and chilli (*Capsicum annuum*) seedling growth. Annals of Microbiology, 62(2): 805-810. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0321-7>
- Andrade-Hoyos P, Luna-Cruz A, Osorio-Hernández E, Molina-Gayosso E, Landero-Valenzuela N, Barrales-Cureño HJ. 2019. Antagonismo de *Trichoderma* spp. vs hongos asociados a la marchitez de chile. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10(6): 1259-1272. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1326>
- Bader AN, Graciela LS, Fernanda C, Verónica FC. 2020. Bioformulation of *Trichoderma harzianum* in solid substrate and effects of its application on pepper plants. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (1): 1-9. <https://doi.org/10.24215/16699513e037>
- Baron NC, Rigobelo EC. 2022. Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture. Mycology, 13(1): 39-55. <https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699>
- Basto-Pool C, Zavala-León M, Cristóbal-Alejo J, Herrera-Parra E. 2023. Efecto de *Trichoderma* en el crecimiento de chile Catiknifap (*Capsicum annuum* L.) y en el control de *Meloidogyne incognita*. Avances en investigación agropecuaria, 27(1): 175-186. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.23.27.29>
- Bautista MÁM, Alejo JC, Aguilar JRP, Ramírez AR. 2022. *Bacillus* spp. en el crecimiento y rendimiento de *Capsicum chinense* Jacq. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 13(1): 115-126. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2664>
- Calderan FEJ, Guerra JWC, Lucio DAO. 2019. Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en cultivos de maíz. UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166, 3(1): 61-72. <https://doi.org/10.47230/unesciencias.v3.n1.2019.128>
- Camacho-Luna V, Rodríguez-Hernández AA, Rodríguez-Monroy M, Norma R, Sepúlveda-Jiménez G. 2022. Identificación de hongos endófitos de *Ageratina pichinchensis* con actividad antagonica contra fitopatógenos de importancia agrícola: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(6): 1027-1040. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i6.3030>

- Casas A, Ladio AH, Clement CR. 2019. Ecology and evolution of plants under domestication in the neotropics. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7: 231-235. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00231>
- Castillo-Reyes F, Hernández-Castillo FD, Gallegos-Morales G, Flores-Olivas A, Rodríguez-Herrera R, Aguilar CN. 2015. Efectividad *in vitro* de *Bacillus* y polifenoles de plantas nativas de México sobre *Rhizoctonia-Solani*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(3): 549-562. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i3.638>
- Celis-Perera SE, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A, Garruña-Hernández R, Tun-Suarez JM, Gamboa-Angulo M. 2023. *Trichoderma asperellum* Ta13-17 in the growth of *Solanum lycopersicum* and biocontrol of *Corynespora cassiicola*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(1): 70-81. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2207-1>
- Celis-Perera SE, Moo-Koh FA, Reyes-Ramirez A, Suárez JMT, Cristóbal-Alejo J. 2021. Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckf. & Nirenberg (Ta13-17) contra hongos patógenos de *Solanum lycopersicum* L. *Revista de Protección Vegetal*, 36(3). <https://cabidigitallibrary.org> by 2806:2f0:83c1:ffcf:201c:a785:48b2:b4cd, on 11/07/24.
- Chen W, Wu Z, Liu C, Zhang Z, Liu X. 2023. Biochar combined with *Bacillus subtilis* SL-44 as an eco-friendly strategy to improve soil fertility, reduce *Fusarium* wilt, and promote radish growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 251, 114509. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114509>
- Chowdhury SK, Majumdar S, Mandal V. 2020. Application of *Bacillus* sp. LBF-01 in *Capsicum annuum* plant reduces the fungicide use against *Fusarium oxysporum*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 27, 101714. Haga clic para copiar la URI a su portapapeles. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101714>
- Corrales-Ramírez MSC, Lucia C, Caycedo-Lozano L, Gómez-Méndez MA, Ramos-Rojas SJ, Rodríguez-Torres JN. 2017. *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova*, 15(27): 46-65. <https://doi.org/10.22490/24629448.1958>
- Domínguez-Martínez I, Meza-Márquez OG, Osorio-Revilla G, Proal-Nájera J, Gallardo-Velázquez T. 2014. Determination of capsaicin, ascorbic acid, total phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. var. serrano by mid infrared spectroscopy (Mid-FTIR) and chemometric analysis. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57: 133-142. <https://doi.org/10.1007/s13765-013-4295-y>
- Doncel A, Chamorro L, Pérez A. 2016. Actividad *in vitro* de bacterias endófitas promotoras de crecimiento asociadas con pasto colosoana en el municipio de Corozal, Sucre. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 8 (S): 351-360. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n0.2016.391>
- Gamboa-Angulo JJ, Ruíz-Sánchez E, Alvarado-López C, Gutiérrez-Miceli F, Ruíz-Valdiviezo VM, Medina-Dzul K. 2020. Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(4): 817-826. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>

- González-Mancilla A, Almaraz-Suarez JJ, Ferrera-Cerrato R, Rodríguez-Guzmán MDP, Taboada Gaytán OR, Trinidad-Santos A. 2018. Rizobacterias y hongos micorrízicos arbusculares asociados con chile poblano en la Sierra Nevada de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9 (SPE20): 4355-4365. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1004>
- González-Mancilla A, Almaraz-Suárez JJ, Ferrera-Cerrato R, Rodríguez-Guzmán MDP, Taboada-Gaytán OR, Trinidad-Santos A, Arteaga-Garibay RI. 2017. Caracterización y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de chile poblano (*Capsicum annuum* L.). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3): 463-474. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.09>
- Grageda-Cabrera OA, Díaz-Franco A, Peña-Cabriaes JJ, Vera-Núñez JA. 2012. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6): 1261-1274. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i6.1376>
- Guigón-López C, Muñoz-Castellanos LN, Flores-Ortiz NA, González-González JA. 2019. Control of powdery mildew (*Leveillula taurica*) using *Trichoderma asperellum* and *Metarhizium anisopliae* in different pepper types. *BioControl*, 64(1): 77-89. <https://doi.org/10.1007/s10526-018-09916-y>
- Helal DS, El-Khawas H, Elsayed TR. 2022. Molecular characterization of endophytic and ectophytic plant growth promoting bacteria isolated from tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) grown in different soil types. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 20(1): 79. <https://doi.org/10.1186/s43141-022-00361-0>
- Hyder S, Gondal AS, Rizvi ZF, Ahmad R, Alam MM, Hannan A, Inam-ul-Haq M. 2020. Characterization of native plant growth promoting rhizobacteria and their anti-oomycete potential against *Phytophthora capsici* affecting chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientific Reports*, 10(1): 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69410-3>
- Kumar A, Elad Y, Tsechansky L, Abrol V, Lew B, Offenbach R, Graber ER. 2018. Biochar potential in intensive cultivation of *Capsicum annuum* L. (sweet pepper): crop yield and plant protection. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2): 495-503. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8486>
- Lara-Mantilla C, Oviedo-Zumaqué LE, Betancur-Hurtado CA. 2011. Bacterias nativas con potencial en la producción de ácido indolacético para mejorar los pastos. *Zootecnia Tropical*, 29(2): 187-194. http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/ZootecniaTropical/ztindice.htm
- León YG, Bernal JO, Reyes MAA, Flores YM. 2022. *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: Características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25 (1): 1-14. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.520>
- Leon-Ttacca B, Ortiz-Calcina N, Condori-Ticona N, Chura-Yupanqui E. 2018. Cepas de *Trichoderma* con capacidad endofítica sobre el control del mildiu (*Peronospora variabilis* Gäm.) y mejora del rendimiento de quinua. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(1): 19-30. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.327>
- Leon-Ttacca B, Ortiz-Calcina N, Pauro-Flores L, Borja-Loza R, Mendoza-Coari PP, Palao-Iturregui LA. 2022. Inoculation methods of native strains of *Trichoderma* sp. and their effect on the growth and

yield of quinoa. In Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia. 39(4): 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n4.10

- Liotti RG, da Silva Figueiredo MI, Soares MA. 2019. *Streptomyces griseocarneus* R132 controls phytopathogens and promotes growth of pepper (*Capsicum annuum*). Biological Control, 138, 104065. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104065>
- Liu FP, Liu HQ, Zhou HL, Dong ZG, Bai XH, Bai P, Qiao JJ. 2014. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from betel nut (*Areca catechu*) and their effects on plant growth and phosphorus mobilization in tropical soils. Biology and fertility of soils, 50: 927-937. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0913-z>
- Liu HX, Li SM, Luo YM, Luo LX, Li JQ, Guo JH. 2014. Biological control of *Ralstonia* wilt, *Phytophthora* blight, *Meloidogyne* root-knot on bell pepper by the combination of *Bacillus subtilis* AR12, *Bacillus subtilis* SM21 and *Chryseobacterium* sp. R89. European journal of plant pathology, 139: 107-116. <https://doi.org/10.1007/s10658-013-0369-2>
- López-Castilla LDC, Garruña-Hernández R, Castillo-Aguilar CDLC, Martínez-Hernández A, Ortiz-García MM, Andueza-Noh RH. 2019. Structure and genetic diversity of nine important landraces of *Capsicum* species cultivated in the Yucatan Peninsula, Mexico. Agronomy, 9(7): 376. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070376>
- López-Valenzuela B, Tzintzun-Camacho O, Armenta-Bojórquez A, Valenzuela-Escoboza F, Lizárraga-Sánchez G, Ruelas-Islas J, González-Mendoza D. 2022. Microorganismos del género *Trichoderma* spp. productores de fitohormonas y antagonistas de fitopatógenos. Bioagro, 34(2): 163-172. <https://doi.org/10.51372/bioagro342.6>
- Luna-Fletes JA, Cruz-Crespo E, Can-Chulim Á, Chan-Cupul W, Luna-Esquivel G, García-Paredes J. D, Mancilla-Villa OR. 2021. Producción de plántulas de chile habanero con fertilización orgánica y biológica. Terra Latinoamericana, 39: 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.988>
- Mao T, Chen X, Ding H, Chen X, Jiang X. 2020. Pepper growth promotion and *Fusarium* wilt biocontrol by *Trichoderma hamatum* MHT1134. Biocontrol Science and Technology, 30(11): 1228-1243. <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1803212>
- Marquina ME, Ramírez Y, Castro Y. 2018. Efecto de bacterias rizosféricas en la germinación y crecimiento del pimentón *Capsicum annuum* L. Var. cacique gigante. Bioagro, 30(1): 3-16. Recuperado de <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/2706>
- Martínez-Canto OJ, Cristóbal-Alejo J, Tun-Suárez JM, Reyes-Ramírez A. 2022. *Trichoderma* spp. como agente de control biológico contra fitopatógenos en *Solanum lycopersicum* L. Avances en investigación agropecuaria, 26(Especial): 19-20. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.19>
- Mendoza-Labrador JA, Bonilla-Buitrago RR. 2014. Infectividad y efectividad de rizobios aislados de suelos de la Costa Caribe colombiana en *Vigna unguiculata*. Revista Colombiana de Biotecnología, 16(2): 84-89. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v16n2.47246>

- Miranda MDS. 2022. Potencial de aislados de *Trichoderma* spp como promotor de crecimiento en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*). Nexo Revista Científica, 35(4): 924-934. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i04.15529>
- Monteiro GP, dos Santos Vasconcelos A, Hanada RE, Blind AD, Silveira TM. 2023. *Bacillus amyloliquefaciens*, *Microbacterium Resistens* e *Stenotrophomonas Maltophilia* no biocontrole de *Corynespora Cassiicola* na cultura do tomate. Brazilian Journal of Development, 9(1): 4677-4697. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-324>
- Morel M, Castillo Y, García S, Conce M, de Dios Moya J, Reynoso T, Alonzo K. 2021. Evaluación de la capacidad endófitas de cepas nativas de *Trichoderma* spp. en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en casa malla. APF, 10(1): 25-40. <https://sodiaf.org.do/apf/index.php/apf/article/view/127>
- Natsiopoulou D, Tziolias A, Lagogiannis I, Mantzoukas S, Eliopoulos PA. 2022. Growth-Promoting and Protective Effect of *Trichoderma atroviride* and *T. simmonsii* on Tomato against Soil-Borne Fungal Pathogens. Crops, 2(3): 202-217. <https://doi.org/10.3390/crops2030015>
- Ortuño N, Miranda C, Claros M. 2013. Selección de cepas de *Trichoderma* spp. generadoras de metabolitos secundarios de interés para su uso como promotor de crecimiento en plantas cultivadas. Journal of the Selva Andina Biosphere, 1(1): 16-32. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2013.010100016>
- Osuna-Canizalez FJ. 2018. Aislamiento y selección *in vitro* de cepas nativas de *Trichoderma* spp. para el biocontrol de *Fusarium* sp. en *Euphorbia pulcherrima*. Agro Productividad, 11(7): 21-27. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/911>
- Passari AK, Lalsiamthari PC, Leo VV, Mishra VK, Yadav MK, Gupta VK, Singh BP. 2018. Biocontrol of *Fusarium* wilt of *Capsicum annuum* by rhizospheric bacteria isolated from turmeric endowed with plant growth promotion and disease suppression potential. European Journal of Plant Pathology, 150: 831-846. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1325-3>
- Patel S, Jinal HN, Amareesan N. 2017. Isolation and characterization of drought resistance bacteria for plant growth promoting properties and their effect on chilli (*Capsicum annuum*) seedling under salt stress. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 12: 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.09.002>
- Pedraza RO, Teixeira KR, Scavino AF, de Salamone IG, Baca BE, Azcón R, Bonilla R. 2010. Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. Revisión. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 11(2): 155-164. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:206
- Peña-Yam LP, Ruíz-Sánchez E, Barboza-Corona JE, Reyes-Ramírez A. 2016. Isolation of Mexican *Bacillus* species and their effects in promoting growth of chili pepper (*Capsicum annuum* L. cv Jalapeño). Indian Journal of Microbiology, 56: 375-378. <https://doi.org/10.1007/s12088-016-0582-8>

- Pérez JPL, Gil RB. 2016. Aspectos básicos de la fijación de nitrógeno atmosférico por parte de bacterias. Estudio en el laboratorio de educación secundaria. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 13(1): 203-209. <http://hdl.handle.net/10498/18024>
- Peréz-Castañeda LM, Castañón-Nájera G, Ramírez-Meraz M, Mayek-Pérez N. 2015. Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum* spp. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 2(4): 117-128. <https://doi.org/10.19136/era.a2n4.721>
- Pérez-Cordero A, Chamorro-Anaya L, Doncel-Mestra A. 2018. Bacterias endófitas promotoras de crecimiento aisladas de pasto colosoana, departamento de Sucre, Colombia. Revista MVZ Córdoba, 23(2): 6696-6709. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1347>
- Pincay A, Noboa M, Viera W, Herrera K, León A, Jackson T. 2021. Evaluación *in vitro* del potencial antagonista de *Trichoderma* sp. y hongos endófitos de mora (*Rubus glaucus* Benth) para el control de *Botrytis cinerea*. Journal of Science and Research, 6(1): 109-124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4917695>
- Pozo YR, Romero LC, Suárez AG, Pérez JG, Álvarez-Rivera VP. 2006. Aislamiento, selección e identificación de bacterias del género *Bacillus* antagonistas de *Pectobacterium carotovorum*. Fitosanidad, 10(3): 187-191. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209116108001>
- Radillo PG, Arias NMM, de la Cruz JLI, PizanoGS, Yáñez JMS. 2019. Crecimiento de *Zea mays* inoculado con *Bacillus cereus* y *Micromonospora echinospora* con fertilizante nitrogenado al 50 %. Journal of the Selva Andina Research Society, 10(1): 16-24. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2019.100100016>
- Ragazzo-Sánchez JA, Robles-Cabrera A, Lomelí-González L, Luna-Solano G, Calderón-Santoyo M. 2011. Selección de cepas de *Bacillus* spp. productoras de antibióticos aisladas de frutos tropicales. Revista Chapingo. Serie horticultura, 17(SPE1): 5-11. <https://revistas.chapingo.mx/horticultura/?section=articles&subsec=issues&numero=107&articulo=1147>
- Reyes-Bonilla J, Quintanilla-Villegas C, Guerrero-Mendoza Z, López-Torres MU. 2024. Efectividad de *Bacillus subtilis* Cohn (1872) y *Trichoderma harzianum* Rifai (1969) sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici (Sacc.) Snyder & Hansen (1940), en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* var. CENTA CUSCATLÁN). Revista Minerva, 7(3): 47-66. <https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18906>
- Reyes-Ramírez A, López-Arcos M, Ruiz-Sánchez E, Latournerie-Moreno L, Pérez-Gutiérrez A, Lozano-Contreras MG, Zavala-León MJ. 2014. Efectividad de inoculantes microbianos en el crecimiento y productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Agrociencia, 48(3): 285-294. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1081>
- Ríos ELV. 2014. Caracteres principales, ventajas y beneficios agrícolas que aporta el uso de *Trichoderma* como control biológico. Revista Científica Agroecosistemas, 2(1): 254-264. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/40>

- Romero-Cortes T, López-Pérez PA, Ramírez-Lepe M, Cuervo-Parra JA. 2016. Modelado cinético del micoparasitismo por *Trichoderma harzianum* contra *Cladosporium cladosporioides* aislado de frutos de cacao (*Theobroma cacao*). Chilean journal of agricultural & animal sciences, 32(1): 32-45. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902016000100004>
- Ruiz-Sánchez E, Mejía-Bautista MÁ, Cristóbal-Alejo J, Valencia-Botín A, Reyes-Ramírez A. 2014. Actividad antagónica de filtrados de *Bacillus subtilis* contra *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.). Revista mexicana de ciencias agrícolas, 5(7): 1325-1332. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i7.877>.
- Sabando-Zambrano GA, Zambrano-Risco ÁA. 2022. Evaluación de cepas de *Trichoderma spp* como bioestimulante en el crecimiento y rendimiento del cultivo de pimiento (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL). <http://repositorio.esпам.edu.ec/handle/42000/1972>
- SIAP. (2023). Base de datos estadísticos de la SIACON. Sitio Web. Consultado en Octubre de 2023, disponible en <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Samaniego-Gómez BY, Garruña R, Tun-Suárez JM, Kantun-Can J, Reyes-Ramírez A, Cervantes-Díaz L. 2016. *Bacillus spp.* inoculation improves photosystem II efficiency and enhances photosynthesis in pepper plants. Chilean journal of agricultural research, 76(4): 409-416. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392016000400003>
- Sánchez-Fernández RE, Sánchez-Ortiz BL, Sandoval-Espinosa YKM, Ulloa-Benítez Á, Armendáriz-Guillén B, García-Méndez MC, Macías-Rubalcava ML. 2013. Hongos endófitos: fuente potencial de metabolitos secundarios bioactivos con utilidad en agricultura y medicina. TIP Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 16(2): 132-146. <http://tip.zaragoza.unam.mx/index.php/tip/article/view/76/76>
- Santos MS, Nogueira MA, Hungría M. 2019. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. Amb Express, 9: 1-22. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>
- Serrano-Mejía C, Bello-Bedoy R, Arteaga MC, Castillo GR. 2022. Does Domestication Affect Structural and Functional Leaf Epidermal Traits? A Comparison between Wild and Cultivated Mexican Chili Peppers (*Capsicum annuum*). Plants, 11, 3062. <https://doi.org/10.3390/plants11223062>
- Sosa-Pech M, Ruiz-Sánchez E, Tun-Suárez JM, Pinzón-López LL, Reyes-Ramírez A. 2019. Germinación, crecimiento y producción de glucanasas en *Capsicum chinense* Jacq. Inoculadas con *Bacillus spp.* Ecosistemas y recursos agropecuarios, 6(16): 137-143. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1801>
- Suárez-Palacios C, Remache-Sánchez N, Pico-Rosado J, Paredes-Puga E, Jiménez-Cumbicus J, Andrade-Olayav L, Delgado-Párraga A. 2023. Aislamiento y evaluación de cepas nativas de *Trichoderma spp.*, como promotor de desarrollo radicular. Revista Ciencia UNEMI, 16(42): 45-54. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol16iss42.2023pp45-54p>

- Tejera-Hernández B, Rojas-Badía MM, Heydrich-Pérez M. 2011. Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 42(3): 131-138. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181222321004>
- Thilagar G, Bagyaraj DJ, Podile AR, Vaikuntapu PR. 2018. *Bacillus sonorensis*, a novel plant growth promoting rhizobacterium in improving growth, nutrition and yield of chilly (*Capsicum annuum* L.). Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 88: 813-818. <https://doi.org/10.1007/s40011-016-0822-z>
- Vargas-Hoyos HA, Gilchrist-Ramelli E. 2015. Producción de enzimas hidrolíticas y actividad antagónica de *Trichoderma asperellum* sobre dos cepas de *Fusarium* aisladas de cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*). Revista mexicana de micología, 42: 9-16. <https://doi.org/10.33885/sf.2015.3.1142>
- Vega-Celedón P, Canchignia-Martínez H, González M, Seeger M. 2016. Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. Cultivos Tropicales, 37: 33-39. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.5158.3609>
- Velasco-Belalcázar ML, Hernández-Medina CA, Gómez-López ED, Torres-González C, Caro-Hernández PA. 2019. Bacterias endófitas de *Capsicum frutescens* antagónicas a *Fusarium* spp. Agronomía Mesoamericana, 30(2), 367-380. <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.31760>
- Verma BC, Pramanik P, Bhaduri D. 2020. Organic fertilizers for sustainable soil and environmental management. In Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production, Springer, Singapur. pp. 289-313. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_10
- Villamarín-Gallegos D, Oviedo-Pereira DG, Evangelista-Lozano S, Sepúlveda-Jiménez G, Molina-Torres J, Rodríguez-Monroy M. 2020. *Trichoderma asperellum*, an inoculant for the production of steviol glycosides in *Stevia rebaudiana* Bertoni plants micropropagated in a temporary immersion bioreactor. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 19(3): 1153-1161. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio947>
- Villarreal-Delgado MF, Villa-Rodríguez ED, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, Santos-Villalobos SDL. 2018. El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. Revista Mexicana de Fitopatología, 36(1): 95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>
- Yadav M, Divyanshu K, Dubey MK, Rai A, Kumar S, Tripathi YN, Upadhyay RS. 2023. Plant growth promotion and differential expression of defense genes in chilli pepper against *Colletotrichum truncatum* induced by *Trichoderma asperellum* and *T. harzianum*. BMC Microbiology, 23(1): 54. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02789-x>
- Yuan J, Sha ZM, Hassani D, Zhao Z, Cao LK. 2017. Assessing environmental impacts of organic and inorganic fertilizer on daily and seasonal Greenhouse Gases effluxes in rice field. Atmospheric Environment, 155: 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.007>

CAPÍTULO 2

***Bacillus subtilis* y *Trichoderma asperellum* EN LA EMERGENCIA Y CRECIMIENTO DE CHILE DULCE (*Capsicum annuum* L.)**

Julio Jacobo Gamboa Angulo, Arturo Reyes Ramírez, Jairo Cristóbal Alejo, Felicia Amalia Moo Koh y San Germán Bautista Parra

Tecnológico Nacional de México/I.T. Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. (MM13800213@conkal.tecnm.mx, arturo.rr@conkal.tecnm.mx).

RESUMEN

Capítulo de la tesis enviado a la revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

El chile dulce (*C. annuum* L) es una hortaliza importante debido a su consumo regional en la Península de Yucatán. El uso excesivo de agroquímicos en la producción de los cultivos, hace más susceptible a la perturbación en los agroecosistemas causando contaminación y resistencia de plagas y patógenos. Los hongos *Corynespora* y *Fusarium* causan enfermedades en las plantas y afectan la agricultura, ocasionando pérdidas considerables en el sector alimentario. Una estrategia de control es el uso de bacterias y hongos antagonistas como *Bacillus subtilis* y *Trichoderma asperellum* como una alternativa en la agricultura sustentable. El objetivo del trabajo fue evaluar las cepas antagonistas in vitro contra los hongos fitopatógenos *Corynespora cassiicola* (ITC23) y *Fusarium equiseti* (FCHE) y productoras de ácido indol acético *B. subtilis* (F8 y M9), y *T. asperellum* Ta13-17 en la emergencia y crecimiento de chile dulce. Los resultados mostraron que las cepas inhibieron el crecimiento micelial de *C. cassiicola* (ITC23) y *F. equiseti* (FCHE). En el porcentaje de emergencia de semillas de chile dulce, sólo la inoculación de *T. asperellum* Ta13-17 mostró aumentar las semillas emergidas. En las variables de crecimiento la inoculación de *B. subtilis* M9, *T. asperellum* Ta13-17 y sus combinaciones aumentaron la

altura de las plántulas. La combinación de *T. asperellum* con *B. subtilis* F8 o M9 mostraron mayor diámetro del tallo. Las cepas de *B. subtilis* (F8 y M9) mostraron capacidad endófito al colonizar los tallos de chile dulce. Los resultados obtenidos muestran que *T. asperellum* y *B. subtilis* tiene potencial en el crecimiento de plántulas de chile dulce.