

**Evaluación de la eficiencia de un extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*)
como bioestimulante de crecimiento y desarrollo de plantas de tomate chonto
(*Lycopersicon esculentum* Mill)**



**Grupo de Biotecnología del Departamento de Química y Departamento de
Biología- GRUBIODEQ**

JESÚS DEL CARMEN CARMONA CAMARGO
Biólogo con énfasis en biotecnología

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA
MONTERÍA-CÓRDOBA**

2023

Evaluación de la eficiencia de un extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*)
como bioestimulante de crecimiento y desarrollo de plantas de tomate chonto
(*Lycopersicon esculentum* Mill)

Jesús del Carmen Carmona Camargo
Biólogo con énfasis en biotecnología

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Biotecnología

Director: Luis Eliecer Oviedo Zumaqué, MSc.

Línea de Investigación en Biofertilizantes

Universidad de Córdoba
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento de Química
Maestría en Biotecnología

2023

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Montería, 2023.

Dedicatoria

Mi tesis va dedicada primeramente a Dios por darme la fuerza, persistencia, paciencia para no desfallecer y haber culminado esta meta.

A mis padres, Darío y Nuris por brindarme su apoyo, amor y consejos que siempre fueron necesarios.

A mi esposa Jhoana por su por su acompañamiento, motivación y persistencia en todo momento para que no desistiera de este objetivo.

A mis hijos: María Belén, Ana, Sonya y Josué que son mi inspiración y Motivación para seguir adelante.

A mis Hermanos: Eucario, Melvin, Leideth, Nuth S, Darío s, Sandy y Katherine, recordando que al lado de Dios y con la consigna para adelante siempre, para atrás nunca.

A Dora Belén G, por sus palabras y consejos siempre fueron apropiados y enriquecedores de conocimientos, gracias.

Agradecimientos

Al MSc. Luis Oviedo Zumaqué, director de este trabajo, por su paciencia y su continua disposición durante el desarrollo de esta investigación.

A la auxiliar de investigación Mara Villalba, por su amistad, sus consejos y persistencia y la ayuda brindada.

Al laboratorio de biotecnología, GRUBIODEQ por facilitar el acceso de recursos académicos y tecnológicos que fueron esenciales para la recopilación de datos y la investigación en general.

A mi familia que con su apoyo y respaldo contribuyeron a culminar esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Resumen.....	11
Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico.....	15
2.1 Planta de tomate Cherry	15
2.3. Estimulación biológica del crecimiento vegetal.....	15
2.4. La rizosfera y su efecto en los microorganismos del suelo.....	16
2.5. Efectos benéficos de las bacterias de la rizosfera sobre la planta	17
2.6. Fijación no simbiótica de nitrógeno atmosférico.	19
2.7. Producción de auxinas.....	20
2.8. Solubilización de fosfatos	22
3. Metodología.....	24
3.1 Tipo de estudio	24
3.2 Área de estudio.....	24
3.3 Determinación de la concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza (<i>Cnidoscolus urens</i>)	24
3.3.1 <i>Recolección de plantas de pringamoza (Cnidoscolus urens) para la preparación del extracto</i>	24
3.3.2 <i>Preparación del extracto de pringamoza (Cnidoscolus urens)</i>	25
3.3.3 <i>Análisis de Microorganismos eficientes</i>	25
3.4 Análisis químico del potencial bioestimulante del extracto de Pringamoza (<i>Cnidoscolus urens</i>)	25
3.4.1 <i>Evaluación de la actividad Solubilizadora de fósforo</i>	25
3.4.2 <i>Evaluación de la actividad fijadora de Nitrógeno</i>	26
3.4.3 <i>Evaluación de la producción de Ácido Indol Acético-AIA</i>	26
3.5 Evaluación del efecto de la inoculación con extracto de pringamoza (<i>Cnidoscolus urens</i>) sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L) en condiciones de invernadero.	26
3.5.1 <i>Tratamiento para eliminar la capa de plaguicida y/o fungicida protectante de la semilla</i> 26	

3.5.2	<i>Inoculación, germinación de las semillas y trasplante de las plantulas</i>	27
3.6	Diseño experimental.....	27
3.7	Parámetros biométricos y rendimientos de tomate	27
3.8	Análisis estadístico.....	27
4.	Resultados y análisis.....	29
4.1	Determinación de la concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza (<i>Cnidoscolus urens</i>)	29
4.1.1	<i>Análisis de Microorganismos eficientes</i>	29
4.2	Evaluación del efecto de la inoculación con extracto de pringamoza (<i>Cnidoscolus urens</i>) sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L) en condiciones de invernadero.....	30
4.3	Altura de la planta	32
4.4	Numero de frutos por planta.....	33
4.5	Numero de racimos por planta	34
5.	Conclusiones.....	38
6.	Recomendaciones	39
7.	Referencias bibliográficas	40
	ANEXOS	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los microorganismos biofertilizantes de acuerdo a su acción.	18
Tabla 2. Descripción de los tratamientos utilizados en el diseño experimental.	27
Tabla 3. Concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza.	29
Tabla 4. Concentración de fósforo solubilizado, nitrógeno fijado y AIA producido por las cepas presentes en el extracto de pringamoza.	30
Tabla 5. Influencia de las inoculaciones bacterianas sobre el crecimiento del tomate a los 90 días después del trasplanta.	30

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Campus universitario Universidad de Córdoba sede central.....	24
Figura 2. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable altura de la planta.	33
Figura 3. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable número de frutos por planta.	34
Figura 4. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable número de racimos por planta. ..	35

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Extracto de pringamoza	51
Anexo 2. cultivo de tomate en condiciones de invernadero.	51
Anexo 3. Análisis estadístico.....	52

Resumen

El extracto de pringamoza, derivado de la planta *Cnidoscolus urens*, emerge como una alternativa prometedora en la agricultura, destacando por sus propiedades beneficiosas para el crecimiento de las plantas. Esta especie tropical, antes clasificada como *Jatropha urens* L., comparte filogenia con el género *Manihot*, integrándose en la tribu *Manihoteae* de la subfamilia *Crotonoideae* de la familia *Euphorbiaceae*. Aunque se asocia comúnmente con *Jatropha*, se diferencia por pelos urticantes, glándulas y una envoltura floral blanca. En el ámbito agrícola, el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) destaca como un cultivo vital, registrando una producción mundial de 186.821.216 toneladas en 2020. Reconocido por su aporte a la dieta humana, es rico en antioxidantes como vitamina C, licopeno y carotenoides, además de azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y flavonoides. Frente a la creciente demanda alimentaria, el uso indiscriminado de fertilizantes químicos genera impactos ambientales. El estudio se centra en evaluar la eficacia de un extracto de pringamoza (*Cnidoscolus urens*) como bioestimulante para el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate chonto (*Lycopersicon esculentum* Mill). El objetivo principal es analizar cómo este extracto afecta positivamente el rendimiento y desarrollo de las plantas de tomate, considerando su potencial como una alternativa beneficiosa para mejorar la producción agrícola. Se realizó un diseño completamente al azar-DCA con 4 tratamientos y 4 repeticiones, con un total de 16 unidades experimentales. Los datos de las variables de respuesta, altura de la planta, número de frutos por planta y número de racimos por planta, se analizaron mediante el análisis de varianza Anova. Las medias se analizaron mediante diferencia mínima significativa (DMS) y prueba de Tukey para conocer el mejor tratamiento. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia del 5%. Se utilizó el software estadístico R. Las concentraciones empleadas y las cepas inoculadas ejercieron una influencia positiva en el crecimiento y desarrollo de las plantas, evidenciando la efectividad de la concentración de 3 ml.L⁻¹ del extracto. Estos resultados respaldan la importancia de considerar cuidadosamente las concentraciones utilizadas en futuras investigaciones y destacan el potencial beneficio de esta estrategia de inoculación en la agricultura y la mejora de los rendimientos vegetales.

Palabras claves: Biofertilizante, Bacterias solubilizadoras de fósforo, Bacterias fijadoras de Nitrógeno, Ácido Indol Acético.

Introducción

La pringamoza (*Cnidoscolus urens*) es una planta que se desarrolla en regiones tropicales, en altitudes que no exceden los 2100 metros sobre el nivel del mar. Anteriormente, esta especie se clasificaba bajo el nombre de *Jatropha urens* L. Su parentesco se enmarca en un contexto botánico interesante, ya que pertenece al género *Cnidoscolus*, el cual guarda una estrecha relación filogenética con el género *Manihot*. Ambos géneros se encuentran agrupados en la tribu *Manihoteae*, una subunidad taxonómica de la subfamilia *Crotonoideae*, que a su vez forma parte de la familia *Euphorbiaceae*. A pesar de que *Cnidoscolus* y *Jatropha* han sido comúnmente asociados debido a sus similitudes botánicas, la diferenciación entre ambos resulta sencilla en virtud de características distintivas. *Cnidoscolus urens* se distingue por la presencia de pelos urticantes, glándulas específicas y una envoltura floral única de color blanco, lo que le confiere una identidad botánica única en comparación con su pariente *Jatropha* (Chaves-Bedoya & Ortíz-Rojas, 2022; Jiménez-Arellanes et al., 2014). Estos aspectos taxonómicos y morfológicos resultan fundamentales para una comprensión precisa de la pringamoza y su relación con otras especies vegetales en el contexto de la familia *Euphorbiaceae*, lo que puede ser relevante tanto desde un punto de vista botánico como para aplicaciones agrícolas y ecológicas.

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), una especie perteneciente a la familia botánica *Solanaceae*, es reconocido como uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia a nivel global. Es una planta de crecimiento rápido, con un ciclo de vida de aproximadamente 60 días. Las plantas de tomate pueden alcanzar una altura de hasta 2 metros, y tienen tallos erectos y hojas alternas. Las flores del tomate son pequeñas y amarillas, y se agrupan en racimos (Zhu et al., 2018). La importancia de este cultivo se evidencia en su impresionante producción mundial que alcanzó las 186.821.216 toneladas de frutos en el año 2020 (Alonso-Salinas et al., 2022). No solo es uno de los cultivos de mayor valor monetario, sino que también representa una contribución esencial a la dieta y nutrición humanas.

El tomate es valorado por su abundancia de componentes nutricionales y beneficiosos para la salud. En particular, se destaca como una fuente rica en antioxidantes, incluyendo la vitamina C, licopeno y carotenoides, que tienen efectos protectores para el organismo. Además de estas sustancias, el tomate es rico en azúcares como la glucosa y la fructosa, así como ácidos orgánicos como el ácido cítrico y málico, que le confieren su característico sabor. También contiene

aminoácidos, principalmente ácido aspártico y glutamato, que son importantes para la nutrición humana. El tomate es rico en ácidos fenólicos y numerosos flavonoides, los cuales tienen propiedades antioxidantes y potencialmente beneficiosas para la salud, siendo de interés en la investigación y la nutrición (Figueira et al., 2014). Esta abundancia de compuestos nutricionales en el tomate no solo lo hace apreciado en la gastronomía, sino que también lo posiciona como un recurso valioso en la promoción de una alimentación saludable y en la investigación científica en busca de comprender sus efectos beneficiosos en la salud humana.

Actualmente se ha hecho necesario incrementar la producción de alimentos para satisfacer las demandas de una población creciente (Gil et al., 2019; Licker et al., 2010), lo cual aumenta el interés por mejorar la productividad de los sistemas agrícolas (Vanlauwe et al., 2010), utilizando grandes cantidades de fertilizantes químicos que mejoren los rendimientos de los cultivos y con ello satisfacer la necesidad de alimentos a nivel mundial, sin embargo, el uso irracional de estos agroquímicos genera impactos negativos al medio ambiente, como la eutrofización de los cuerpos de agua superficiales, disminución de la calidad de los suelos agrícolas, Etc.

Algunas bacterias, como las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) pueden promover el crecimiento de la planta a través de diversos mecanismos, como la producción de fitohormonas, auxinas, citoquininas y ácido indol acético (IAA), la mejora del suministro de nutrientes de la planta, a través de la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo (Z. Li et al., 2023; Sriwati et al., 2023), la inhibición de fitopatógenos y la modificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Wang et al., 2022). La utilización de estos agentes biológicos en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años, estableciéndose como una estrategia que responde al fortalecimiento de sistemas de producción sostenible, sin influir en la contaminación ambiental (Pérez & Oviedo, 2019), por ello, en esta investigación se tuvo como objetivo, evaluar la eficiencia de un extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*) como bioestimulante de crecimiento y desarrollo en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*) como bioestimulante de crecimiento y desarrollo en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)

1.2 Objetivos específicos

- 1.2.1. Determinar la concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*)
- 1.2.2. Analizar químicamente el potencial bioestimulante del extracto de Pringamoza (*Cnidocolus urens*)
- 1.2.3. Evaluar el efecto de la inoculación con extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*) sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en condiciones de invernadero

2. Marco teórico

2.1 Planta de tomate Cherry

El tomate cherry (*Lycopersicon esculentum* Mill) es una variante de tomate que se cultiva por su destacado perfil nutricional y sus características organolépticas sobresalientes. Este pequeño fruto es reconocido por su alto contenido de carotenoides, vitamina C, compuestos fenólicos y sólidos solubles, lo que lo convierte en una elección popular tanto en la cocina como en la agricultura (Anwarzai et al., 2020). Bajo condiciones de campo abierto, se ha registrado un rendimiento promedio de aproximadamente 27.48 toneladas por hectárea (SIAP, 2012). Sin embargo, es bajo condiciones controladas en invernadero donde el tomate cherry alcanza su máximo potencial. Se han reportado rendimientos promedio notables de alrededor de 78.39 toneladas por hectárea, lo que destaca la eficacia de esta modalidad de cultivo para optimizar la producción de tomate cherry (Márquez-Hernández et al., 2006). La elección de cultivar tomate cherry en invernaderos ofrece ventajas significativas. Este entorno proporciona un control preciso de factores como la temperatura, la humedad y la iluminación, lo que influye en el desarrollo y la calidad de los frutos. Además, reduce la exposición a plagas y enfermedades, lo que puede resultar en una mayor eficiencia en el uso de recursos y una producción más constante y predecible. El tomate cherry, con su sabor dulce y una amplia variedad de colores, es apreciado en ensaladas, como aperitivo o en platillos culinarios sofisticados. Su creciente popularidad, junto con sus beneficios nutricionales y la capacidad de cultivo tanto en campo abierto como en invernaderos, lo convierte en una opción versátil y rentable para los agricultores y una delicia para los amantes de la buena cocina.

2.3. Estimulación biológica del crecimiento vegetal

La alta dependencia de fertilizantes de síntesis química de los sistemas agrícolas convencionales pueden conducir a la degradación ambiental, por lo que es importante buscar nuevas tecnologías que ayuden a mantener el equilibrio ecológico mientras mejoran la producción de alimentos (Solís et al., 2023). Un ejemplo de ello es la estimulación biológica mediante el uso de biofertilizantes que contienen microorganismos conocidos como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) (Shilev, 2020) que promueven un mejor desarrollo de nutrientes cerca de la raíz de las plantas para proporcionar mejores condiciones de crecimiento (Kour et al.,

2020). Las PGPR pueden beneficiar el rendimiento del cultivo a través de mecanismos directos o indirectos. Los efectos directos incluyen estimular el desarrollo de las plantas a través de la producción de reguladores de plantas, mejorar la absorción de nutrientes y la germinación de semillas, degradar compuestos fitotóxicos e inducir resistencia sistémica (Gutiérrez-Santa Ana et al., 2020).

2.4. La rizosfera y su efecto en los microorganismos del suelo

La rizosfera es la capa de suelo que está junto a las raíces y que encuentra bajo la influencia directa de esta. Las raíces de las plantas secretan muchas moléculas hidrosolubles como azúcares, aminoácidos, fitohormonas, ácidos orgánicos, vitaminas y otros factores de crecimiento que afectan el número y diversidad de los microorganismos en el suelo cercano (Yepes, 2014). La rizosfera es compleja y permite la existencia de múltiples nichos que sustentan una comunidad microbiana con efectos diversos sobre la planta y sobre microorganismos no rizosféricos (Zhang et al., 2023). Los microorganismos del suelo realizan muchas funciones importantes para la aptitud de las plantas y el ciclo biogeoquímico (Brunel et al., 2020). Para estos microorganismos, la rizosfera vegetal representa un nicho único que se ve afectado por los procesos de la planta, como la absorción de nutrientes y la liberación de fotosintato (Lambers et al., 2009). En comparación con el suelo a granel, los cambios ambientales derivados de las plantas pueden alterar la biodiversidad, la composición y, por lo tanto, las funciones de las comunidades microbianas que habitan la rizosfera, lo que se conoce como efecto de la rizosfera (Philippot et al., 2013; Sasse et al., 2018; Schneijderberg et al., 2020).

Generalmente se hace referencia a la superficie de las raíces como una parte distinta de la rizosfera, aunque bien podría considerarse un continuum (Yepes, 2014). Esta compleja intersección raíz-suelo, que dista de tener superficies parejas, es conocida como rizoplano, y juega un papel preponderante en la interrelación de los microorganismos con la planta debido a una mayor cercanía de los microorganismos que en el resto del suelo rizosférico (Dennis et al., 2010).

Los factores de crecimientos y nutrientes secretados por las raíces sirven como sustento a una gran variedad de microorganismos, los cuales pueden ser benéficos, dañinos o comensales (Yepes, 2014). Debido a que muchas de estas moléculas son limitantes en el suelo sin raíces, la competencia por los nutrientes en el rizoplano y en la rizosfera depende de la capacidad

competitiva de los microorganismos; se pueden encontrar estrategias como: alta tasa de crecimiento, producción de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas, cianuro de hidrógeno, lipopéptidos cíclicos. Es usual encontrar una mayor cantidad de microorganismos generalmente bacterias en el suelo de la rizosfera que en el suelo sin raíces (Compant et al., 2010a).

El tipo de suelo, la especie vegetal y la zona de la raíz son factores que interaccionan y afectan la abundancia y diversidad de la comunidad microbiana de la rizosfera. La cantidad y la composición de los exudados radiculares, así como también la cantidad de detritos y células muertas en el proceso normal de crecimiento pueden variar mucho entre plantas y entre microzonas de la misma raíz (Yepes, 2014). Estas variaciones pueden terminar por favorecer a diferentes grupos de microorganismos en competencia, aun cuando una buena parte de ellos son comunes en muchas rizosferas (Marschner et al., 2001).

2.5. Efectos benéficos de las bacterias de la rizosfera sobre la planta

Las PGPR pueden dividirse en dos grandes grupos, dependiendo el efecto que estas tengan sobre la planta, si es directo o indirecto (Yepes, 2014). En el primer grupo se encuentran aquellas que aumentan directamente la captación de nutrientes minerales y que producen hormonas fitoestimuladoras; en el siguiente grupo se encuentran aquellas que, por su capacidad para contrarrestar patógenos, nematodos o plagas (Almaghrabi et al., 2013), reducen el daño o la colonización y de esta manera procuran mejores condiciones para el desarrollo vegetal. Este último grupo puede ser considerado más como biocontroladores que como biofertilizantes propiamente dichos (Trujillo et al., 2013).

Múltiples son los beneficios que han sido reportados debidos a la presencia de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la rizosfera, entre estos se incluyen: aumento de la germinación, mayor formación de raíces, mejora del crecimiento, aumento de la producción, aumento de nutrientes minerales en los tejidos vegetales (Marques et al., 2010), mayor resistencia a patógenos debido a un mejor estado fisiológico o estimulación de la defensa inducida, mayor tolerancia a la salinidad o al estrés hídrico, entre otros (Saravanakumar et al., 2007).

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal propiamente dichas se piensan que producen su efecto por varios mecanismos (ver tabla 1). Entre los más importantes, y por ello los más estudiados, entre estos: la fijación de nitrógeno atmosférico su posterior asimilación por las raíces

de las plantas, la solubilización de nutrientes minerales como el fósforo en formas asimilables por las plantas, la producción de hormonas estimuladoras del crecimiento vegetal como la auxina ácida indol-acético y la producción de sideróforos quelantes de hierro (Martínez-Viveros et al., 2010). Una misma bacteria puede tener dos o más actividades promueven el crecimiento vegetal tanto directa, como indirectamente, por ejemplo, las bacterias del género *Pseudomonas* pueden producir auxinas vegetales, sideróforos y sustancias antifúngicas (Ahmad et al., 2008).

Tabla 1. Clasificación de los microorganismos biofertilizantes de acuerdo a su acción.

Acción	Tipo de PGPR	Definición	Mecanismo
Directa	Biofertilizantes	Bacterias que luego de aplicadas a las plantas o semillas pueden colonizar la rizosfera o las raíces y tienen la capacidad de aumentar la disponibilidad de nutrientes para las plantas.	<ul style="list-style-type: none"> • Fijación de nitrógeno atmosférico • Solubilización de fosfatos minerales insolubles.
	Fitoestimuladores	Son aquellas bacterias que producen o modifican hormonas reguladoras del crecimiento vegetal como las auxinas, el etileno o la giberelina.	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de ácido indol-3-acético, citoquininas y giberelinas
Indirecta	Biocontroladores	Microorganismos que pueden reducir el ataque de fitopatógenos mediante la producción de sustancias antibióticas o competencia y de esta manera mejoran indirectamente el crecimiento de las plantas.	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de antibióticos, sideróforos • Competencia por espacio y nutrientes • Producción de enzimas quitinolíticas y sustancias antifúngicas.

Fuente: tomado y adaptado de: (Bashan, 1998; Chang & Yang, 2009; Garbanzo-León et al., 2017; Kochar & Srivastava, 2012)(Yepes, 2014).

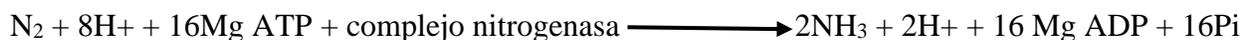
2.6. Fijación no simbiótica de nitrógeno atmosférico.

El nitrógeno es un nutriente sumamente importante en la agricultura y su disponibilidad es crítica para la producción agrícola. Muchos microorganismos, principalmente bacterias, tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico utilizando complejos enzimáticos nitrogenasa. Esta capacidad ha sido muy estudiada y constituye una de las características que se desea en bacterias de vida libre prospectadas como potenciales biofertilizantes. En cuanto a las bacterias que forman simbiosis fijadoras de nitrógeno con raíces de leguminosas, como los géneros *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*, estas no se consideran bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PRPR) a menos que se asocien con plantas distintas a las leguminosas sin formar simbiosis (Martínez-Viveros et al., 2010).

La importancia de la fijación de nitrógeno atmosférico en el suelo estriba en la escasez relativa de este elemento en el suelo, además, el nitrógeno junto con el fósforo y el potasio, conforman el grupo de nutrientes más importantes en la agricultura (FAOSTAT, 2022). Grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados son aplicadas anualmente y la tendencia es que países emergentes como China o Brasil, en la medida que se vayan desarrollando, aumenten el uso de estos fertilizantes en lo que podría considerarse una “revolución verde” tardía (Yepes, 2014).

Las bacterias de vida libre más estudiadas por su capacidad fijadora son *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium* (no leguminosas), *Azoarcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Burkholderia*. Estas bacterias, han sido asociadas a incrementos de variables como desarrollo radicular, nitrógeno en partes de la planta, crecimiento y rendimiento en masa seca (Compant et al., 2010b; Singh et al., 2011).

El proceso metabólico de fijación de nitrógeno que se da en las bacterias diazótrofes inicia con el rompimiento del triple enlace entre los átomos del nitrógeno molecular ($N\equiv N$) que requiere una gran cantidad de energía como se muestra en la siguiente reacción:



Esa energía puede ser suministrada fácilmente en condiciones In-Vitro, permitiendo una fijación máxima. No obstante, cuando las fuentes de carbono son limitantes, la fijación se hace menos conveniente energéticamente para la célula. Este hecho hace que los diazótrofes de vida libre no puedan igualar el nivel de fijación que tienen los rizobios simbióticos de leguminosas, las cuales no tienen que competir por los exudados radiculares y los pocos nutrientes existentes en el suelo

(Martínez-Viveros et al., 2010). Por tanto, es poco probable que las bacterias fijadoras puedan suplir todos los requerimientos de nitrógeno de la mayoría de plantas de cultivo, más aún cuando estas han sido seleccionadas por su alto rendimiento y requerimiento de fertilizante.

Cuando las bacterias estimuladoras del crecimiento vegetal logran competir y asimilar nutrientes se ha demostrado que producen mejoras significativas del crecimiento de plantas de cultivo. (Reyes et al., 2008) aisló y evaluó bacterias no-diazotróficas y diazotróficas, entre ellas los fijadores *Rhizobium*, *Azotobacter* y *Azospirillum*. Se demostró que cuando estos fueron inoculados en plantas de pimentón, aumentaron de forma estadísticamente significativa el número de botones florales, el peso seco aéreo y el contenido de nitrógeno y fósforo de las plantas en condiciones de umbráculo. Este estudio, sin embargo, no permite concluir que el efecto estimulador provenga exclusivamente de la capacidad fijadora, debido a que posiblemente estos mismos microorganismos estén en capacidad de producir hormonas fitoestimuladora o de solubilizar fosfatos del suelo. Lo común de esta situación dificulta el aislamiento de los efectos de la fijación de nitrógeno en la estimulación del crecimiento vegetal.

A pesar de las dificultades que puedan existir, se ha demostrado que la aplicación de biofertilizantes con microorganismos diazotófos puede ser de gran utilidad en la agricultura comercial, utilizándolos conjuntamente con fertilizantes minerales en dosis menores a las que normalmente se aplican. Es decir, que estas bacterias pueden reemplazar parcialmente a los fertilizantes sin que haya a lugar una disminución apreciable del rendimiento del cultivo, o incluso un incremento la producción de los cultivos por este método (Hellal & Mahfouz, 2011).

2.7. Producción de auxinas

Las auxinas son hormonas vegetales reguladoras del crecimiento y participan en casi todas las etapas del desarrollo de la planta, siendo común que esta modulación se dé coordinadamente con otras hormonas vegetales. Las auxinas están involucradas en el fototropismo, inducen la formación de raíces en cultivos de callos in-vitro y en ciertos casos limitan la elongación de las raíces principales mientras estimulan las raíces laterales (Woodward et al., 2005). Muchos microorganismos estimuladores del crecimiento vegetal tienen la capacidad de secretar auxinas y participar en la estimulación del crecimiento vegetal e incluso en la modificación de la arquitectura radicular, producto de intrincadas interacciones. Se piensa que las auxinas juegan un papel

importante en las interacciones benéficas iniciales de los microorganismos con las raíces (Sukumar et al., 2013).

La auxina producida por PGPR más importante y más estudiada es el ácido indol-3-acético (AIA) (Dodd et al., 2010). Existen varias rutas por las cuales plantas y microorganismos (tanto PGPR como fitopatógenos) pueden sintetizar el ácido indol-acético, la ruta de biosíntesis suele partir del aminoácido triptófano y por lo general se nombran de acuerdo uno de sus intermediarios, aunque también existen rutas independientes de este.

Las vías de síntesis de ácido indol-3-acético son: (i) La vía indol-3-acetamida, que ha sido ampliamente estudiada en los fitopatógenos *Agrobacterium tumefaciens* y *Pseudomonas syringae pv savastanoi*, solo requiere dos pasos para convertir triptófano en AIA; primero actúa la enzima triptófano-2-monooxigenasa, convirtiendo el triptófano en indol-3-acetamida y luego la enzima indol-3-acetamida hidrolasa produce AIA (Aguilar-Piedras et al., 2008). En bacterias, esta ruta es la que mejor ha sido caracterizada. (ii) La vía indol-3-piruvato es según se cree, la más importante en plantas, aunque también se encuentra en bacterias rizosféricas como *Azospirillum*, *Rhizobium* o *Enterobacter cloacae* (Dodd et al., 2010; Ryu & Patten, 2008). En esta ruta, el triptófano pasa a ácido indol-3-pirúvico por acción de aminotransferasas, luego a indol-3-acetaldehído y finalmente a AIA por un aldehído-deshidrogenasa. (iii) En la vía de la triptamina se da una conversión inicial de triptófano a triptamina por la enzima triptófano descarboxilasa, luego se transforma en indol-3-acetaldehído y finalmente se da la transformación a AIA al igual que en la ruta del indol-3-piruvato. (iv) En la ruta del indol-3-acetonitrilo se da un paso final de indol-3-acetonitrilo en AIA por una nitrilasa, aunque no se conocen con precisión los pasos previos de la biosíntesis. (v) Por último la vía independiente del triptófano es importante en plantas y se ha determinado que podría partir de indol-3-glicerol fosfato (Aguilar-Piedras et al., 2008; Spaepen et al., 2007).

Las bacterias fitoestimuladoras productoras de AIA se destacan entre las bacterias biofertilizantes y a su vez el género *Azospirillum* destaca entre las bacterias fitoestimuladoras. Este género ha sido muy estudiado, sobre todo por su efecto sobre plantas como arroz, maíz, sorgo, pastos y otras monocotiledóneas, aunque también se ha demostrado su utilidad en plantas dicotiledóneas (Kochar & Srivastava, 2012).

Constantemente mejora el entendimiento de la participación del AIA en el establecimiento de la asociación entre microorganismos de vida libre y las raíces de las plantas. Se ha encontrado que

mutantes de *Azospirillum brasilense* con sobre-expresión de los genes para la producción de AIA tienen un mayor efecto estimulador del crecimiento vegetal como la estimulación de la germinación y la formación de pelos radicales que las cepas salvajes. Por lo anterior, se piensa que hay una relación directa entre la producción de AIA y la fitoestimulación, aunque ciertamente podría haber un punto óptimo dependiendo de condiciones del suelo y del tipo y madurez de planta (Kochar & Srivastava, 2012).

2.8. Solubilización de fosfatos

El fósforo es después del nitrógeno, el segundo mineral más importante para el desarrollo vegetal, este hace parte de muchas moléculas importantes en las células incluyendo moléculas energéticas y los ácidos nucleicos. A diferencia del nitrógeno, no se encuentra como una reserva inagotable en la atmósfera que pueda ser fijada ni posee una solubilidad y movilidad alta, el fósforo es el mineral más insoluble que existe en muchos suelos y por tanto puede encontrarse precipitado en forma de compuestos insolubles y por tanto con baja biodisponibilidad en el suelo. Muchos microorganismos rizosféricos, principalmente hongos y bacterias, pueden solubilizar los compuestos de fosfato precipitados y mineralizar fosfatos de origen orgánico para hacerlos disponibles a las plantas en forma de moléculas que pueden ser fácilmente absorbidos por las raíces (Yepes, 2014).

Los microorganismos solubilizadores de fosfatos son relativamente abundantes y son más activos en el rizoplasma y la rizosfera. Dada la poca cantidad de nutrientes en el suelo, los hongos y bacterias que solubilizan fosfatos necesitan aprovechar las sustancias carbonadas de la rizosfera para poder ejercer su efecto sobre los minerales del suelo. Entre estos microorganismos podemos encontrar hongos filamentosos de hábito saprófito como *Aspergillus niger* o *Penicillium sp.* y hongos formadores de micorrizas como los géneros simbióticos *Glomus* y *Gigaspora*, esta capacidad también se encuentra ampliamente distribuida entre las bacterias, encontrándose en especies de géneros tan diversos como *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Pantoea*, *Serratia*, *Enterobacter*, *Azotobacter* y *Bacillus* (Pérez et al., 2007).

Los mecanismos por los cuales las bacterias solubilizan los minerales de fósforo en el suelo no están claros, no obstante, se ha encontrado que principalmente se debe a la producción de ácidos orgánicos y la quelación. Las bacterias solubilizadoras de fosfatos son capaces de excretar ácidos

orgánicos como ácido glucónico, ácido oxálico, ácido cítrico, ácido láctico, entre otros. Estos ácidos son capaces de disolver minerales de fósforo mediante un proceso de intercambio aniónico de iones PO_4^{2-} por los aniones ácidos, este proceso también se puede dar por quelación de los iones de aluminio y hierro asociados a los fosfatos. Cabe anotar que algunos microorganismos que son capaces de producir ácidos orgánicos in-vitro no son capaces de solubilizar fosfatos en el suelo, por lo cual la correlación entre la producción de ácidos orgánicos y la solubilización de fosfatos no es del todo confiable (Khan et al., 2009).

Las bacterias solubilizadoras de fosfatos se han encontrado en rizosferas de plantas de diversas latitudes y en diferentes agroecosistemas y se ha demostrado que tienen la capacidad de estimular el crecimiento vegetal. (Mamta et al., 2010) encontró que plantas de *Stevia rebaudiana* inoculadas con bacterias solubilizadoras eran significativamente más altas y con mayor biomasa en hojas y tallos que las plantas controles, llegando hasta un incremento del 82,5% en la biomasa total cuando se inoculó un consorcio de estos microorganismos. En ese mismo estudio también se encontró incrementos hasta de 250% en el contenido de *rebaudiósido A* y *esteviósido* por gramo de peso seco de hojas, los cuales son de importancia en la industria como endulzantes.

Como microorganismos estimuladores de crecimiento vegetal, los solubilizadores de fosfato pueden presentar mecanismos de estimulación adicional, no obstante, la estimulación del crecimiento puede darse en mejores condiciones cuando se combinan microorganismos con diferentes características metabólicas, e incluso con hongos micorrízicos y rizobios simbióticos (Yepes, 2014). (Matias et al., 2009), encontró que el uso combinado de *rizobios*, hongos micorrízicos y microorganismos solubilizadores de fosfato incrementaba el contenido de fósforo en las hojas y el porcentaje de supervivencia de plantas de *Centrosema coriaceum* (Leguminosae) y *Tibouchina multiflora* (Melastomataceae), lo cual mejoró el proceso de recuperación de una zona de minería de hierro.

3. Metodología

3.1 Tipo de estudio

Este estudio es de tipo experimental

3.2 Área de estudio

Esta investigación se desarrolló en el laboratorio de biotecnología-GRUBIODEQ y en el laboratorio de propagación vegetal-vivero, de la Universidad de Córdoba, ubicada en el municipio de Montería-Córdoba, cuyas coordenadas geográficas son: latitud 8°47'32" norte y longitud 75°51'45" oeste. En la zona predomina un régimen de precipitaciones bimodal con un promedio anual de 1300 mm y una temperatura promedio de 28 °C (Chacón-Pacheco et al., 2017).



Figura 1. Campus universitario Universidad de Córdoba sede central.

Fuente: google maps

3.3 Determinación de la concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza (*Cnidoscolus urens*)

3.3.1 Recolección de plantas de pringamoza (*Cnidoscolus urens*) para la preparación del extracto

Se colectaron plantas de pringamoza en el municipio de Sahagún-Córdoba, corregimiento la Ye y fueron transportadas al laboratorio de biotecnología-GRUBIODEQ, de la Universidad de Córdoba, para su posterior procesamiento y fermentación. Se tuvo en cuenta que las plantas presentaran buenas características fisiológicas como abundante follaje, coloración intensa y ausencia de manchas en las hojas.

3.3.2 Preparación del extracto de pringamoza (*Cnidocolus urens*)

Las plantas se secaron a la sombra, se seccionaron y luego se redujeron a polvo utilizando un triturador y se almacenaron en la oscuridad a 4 °C hasta su uso (El Khetabi et al., 2023). Se mezclaron 200g de planta pulverizada con 2 litros de agua del grifo previamente almacenada por tres días para favorecer la pérdida de cloro; la mezcla se preparó en un recipiente de vidrio y se agitó diariamente unos 10 minutos por un período de 15 días donde alcanzó su madurez (Bouabid et al., 2020). Una vez cumplido el proceso de fermentación, el extracto fue filtrado con gasa estéril para separar el material fibroso. Se almacenó en un recipiente de vidrio para los posteriores análisis.

3.3.3 Aislamiento y cuantificación de microorganismos eficientes

Se realizaron diluciones seriadas de 1:10 a partir del extracto de pringamoza obtenido inicialmente, de 10^{-1} hasta 10^{-8} , las cuales fueron sembradas en caja de petri con medios apropiados e incubadas a una temperatura de $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 48-72 horas; después de este tiempo se observaron las colonias típicas. Se emplearon el medio de cultivo Burk's para aislar y cuantificar bacterias fijadoras de nitrógeno y productoras de ácido indol acético (AIA), se utilizó el medio NBRIP, para aislar, cuantificar y multiplicar bacterias solubilizadoras de fosfato (Machaca, 2017; Pérez & Oviedo, 2019; Tejera-Hernández et al., 2013). La *Pseudomonas sp* se aisló en agar cetrimide (Widnyana & Javandira, 2016).

3.4 Análisis químico del potencial bioestimulante del extracto de Pringamoza (*Cnidocolus urens*)

3.4.1 Evaluación de la actividad Solubilizadora de fósforo

Para determinar la actividad solubilizadora de fosfato se utilizó el método de Molibdovanadato (Feng et al., 2018). Las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro visible a una longitud de onda de 440nm, empleando una curva patrón con concentraciones conocidas de fosfatos (F. L. P. Pérez & Oviedo, 2019). Para esta prueba los blancos fueron medios de cultivo NBRIP líquido libre de microorganismos. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado.

3.4.2 Evaluación de la actividad fijadora de Nitrógeno

Para evaluar el contenido de nitrógeno asimilable por las plantas, se utilizó el método indirecto colorimétrico de Berthelot: fenol-hipoclorito (Lara et al., 2008). Las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro a 632,9 nm (Pérez & Oviedo, 2019). Se realizaron todos los ensayos por triplicado.

3.4.3 Evaluación de la producción de Ácido Indol Acético-AIA

El ácido indol acético (AIA) producido por las bacterias del extracto vegetal (consorcio de fermentación natural), se cuantificó por la técnica colorimétrica utilizando el reactivo Salkowski preparado a partir de cloruro férrico en ácido sulfúrico, se empleó medio de cultivo Burk's Korea y las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 527 nm (Lara et al., 2008; F. L. P. Pérez & Oviedo, 2019). Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

3.5 Evaluación del efecto de la inoculación con extracto de pringamoza (*Cnidoscopus urens*) sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) en condiciones de invernadero.

3.5.1 Tratamiento para eliminar la capa de plaguicida y/o fungicida protectante de la semilla

Se utilizaron semillas comerciales y certificadas de tomate chonto. Las semillas fueron lavadas varias veces con agua destilada estéril y agitación por 5 minutos a 300 rpm para eliminar el recubrimiento antifúngico, esto con el fin de evitar alteraciones de los resultados del experimento, posteriormente estas fueron sometidas a esterilización de superficie, sumergiéndolas por 20 minutos en una solución de NaClO 1% en agitación constante a 100 rpm. Pasado este tiempo, las semillas fueron lavadas cinco veces con agua destilada estéril y escurridas en condiciones asépticas en cabina de flujo laminar (Poonguzhali et al., 2007).

3.5.2 Inoculación, germinación de las semillas y trasplante de las plántulas

Las semillas de tomate “chonto” se sumergieron durante 60 minutos en el extracto de pringamoza a diferentes concentraciones (1, 2 y 3 mL.L⁻¹) y luego se sembraron en bandejas de germinación (50 cavidades piramidales invertidas de 2.5 x 6.5 cm, longitud lateral x profundidad) llenas de suelo natural. 40 días después de la germinación, las plántulas se trasplantaron a materas de 2000 cc con suelo natural y se llevaron a casa malla hasta producción. Las plantas de tomate se reinocularon cada 15 días hasta los 90 días después del trasplante (DDT) (Palacio-Rodríguez et al., 2022).

3.6 Diseño experimental

Se realizó un diseño completamente al azar-DCA con 4 tratamientos y 4 repeticiones, con un total de 16 unidades experimentales. Los tratamientos se describen a continuación:

Tabla 2. Descripción de los tratamientos utilizados en el diseño experimental.

Tratamientos	Concentración de extracto de pringamoza
T1	Control (agua)
T2	1 mL L ⁻¹
T3	2 mL L ⁻¹
T4	3 mL L ⁻¹

3.7 Parámetros biométricos y rendimientos de tomate

Se realizó un solo muestreo a los 90 DDT a casa malla, en el que se determinó el efecto del extracto en el crecimiento y desarrollo de la planta, y el rendimiento del cultivo; se cosecharon cuatro plantas por tratamiento y se midió la longitud de la planta, número de frutos por planta y número de racimos por planta (Palacio-Rodríguez et al., 2022).

3.8 Análisis estadístico

Los datos de las variables de respuesta, altura de la planta, número de frutos por planta y número de racimos por planta, fueron sometidos a un diseño completamente al azar (DCA), con 4 tratamientos donde uno es el control, cada uno con 4 repeticiones, para determinar si existen

diferencias significativas entre ellos, seguidamente se lleva a cabo el análisis por coeficientes de polinomios ortogonales para obtener la dosis optima entre los tres tratamientos con dosis 0 mL^{-1} , 1 mL^{-1} , 2 mL^{-1} y 3 mL^{-1} , igualmente espaciados. Finalmente, para corroborar que existan diferencias entre el control y los tres tratamientos con las distintas dosis se realiza la prueba de Dunnett. Todo esto con un nivel de significancia del 5% y los análisis se realizaron en Excel y R studio.

4. Resultados y análisis

4.1 Determinación de la concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza (*Cnidoscolus urens*)

4.1.1 Análisis de Microorganismos eficientes

Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal mostraron un crecimiento óptimo en el extracto de pringamoza tal como se muestra en la tabla 3. Se observa que las concentraciones de estos grupos de bacterias se encuentran en el orden de 10^8 UFC/mL, concentración óptima para utilizar estos microorganismos como bioestimulantes del crecimiento y desarrollo vegetal. Estos resultados concuerdan con (Lara et al., 2010), los cuales evaluaron el crecimiento, desarrollo y viabilidad de una cepa bacteriana nativa *Azotobacter* A15M2G con potencial biofertilizante, sobre un medio de cultivo preparado con residuos sólidos vegetales procedentes del mercado: *Brassica Oleracea* (repollo), *Lactusa sativa* (lechuga) y *Allium fistulosum* (cebollín), hallando crecimiento óptimo de la cepa en estudio. Esto indica que estos extractos se pueden utilizar como medio de cultivo para este tipo específico de bacterias.

Tabla 3. Concentración de bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en el extracto de pringamoza.

Microorganismos	UFC/mL
Bacterias fijadoras de nitrógeno	$3,43 \times 10^8$
Bacterias solubilizadoras de fósforo	$1,39 \times 10^8$
<i>Pseudomonas spp</i>	$2,87 \times 10^6$
Bacterias productoras de ácido indol acético- AIA	$2,27 \times 10^8$

La respuesta al efecto remediador de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal es muy variada, una de las cuales depende del impacto positivo en la productividad de las plantas (Shang et al., 2023). Se evaluó la producción de ácido indol acético, que arrojó un valor de 53.11 mg/L, la fijación de nitrógeno en forma de ion amonio se cuantificó en 440.298 mg/L, y, además, estas bacterias fueron capaces de solubilizar 576.478 mg/L de fósforo como se muestra en la tabla 4. Estos resultados corroboran que el extracto de pringamoza es favorable para mantener las características diazótrofes, con capacidad de producir auxina y solubilizar fósforo, lo que respalda

su potencial como biofertilizante. Estos resultados son superiores a los publicados por (Lara et al., 2010), quienes evaluaron la capacidad para producir AIA y fijar nitrógeno, y obtuvieron valores de 13.5837 mg/l y 4.8725 mg/l, respectivamente.

Tabla 4. Concentración de fósforo solubilizado, nitrógeno fijado y AIA producido por las cepas presentes en el extracto de pringamoza.

Parámetro	Concentración mg/l
Nitrógeno en forma de ion amonio	440,298
Ácido indol acético (AIA)	53,111
Fósforo solubilizado	576,478

El amoníaco, al funcionar como un macronutriente, favorece el desarrollo de las plantas, estimulando su crecimiento. Por otro lado, el Ácido Indolacético (AIA) desencadena un incremento en la longitud y fortaleza de las raíces, promoviendo así el sistema radicular (Pathania et al., 2023). Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se deduce que el extracto de pringamoza tiene un alto potencial para promover el crecimiento de las plantas y se evaluó adicionalmente su capacidad para funcionar en la rizosfera del tomate.

4.2 Evaluación del efecto de la inoculación con extracto de pringamoza (*Cnidoscolus urens*) sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) en condiciones de invernadero.

Durante la evaluación de los efectos de las inoculaciones en el desarrollo de las plantas, se identificaron impactos altamente significativos en múltiples aspectos, entre los que se incluyen la longitud de la planta, el número de frutos y número de racimos por planta. Es importante destacar que las plantas se mantuvieron en un estado de salud óptimo durante el estudio, sin la presencia de plagas que pudieran interferir con los resultados.

Tabla 5. Influencia de las inoculaciones bacterianas sobre el crecimiento del tomate a los 90 días después del trasplanta.

Variable de respuesta	T1(Control)†	T2†	T3†	T4†
Altura de la planta (cm)	113.35 ± 0.59	115.05 ± 0.70*	125.05 ± 0.97*	138,02 ± 0.69*
Nº frutos por planta	26.5 ± 1.0	33.2 ± 1.0*	34.75 ± 0.50*	39.5 ± 0.58*
Nº racimos por planta	10.75 ± 0.5	12.75 ± 0.5*	14.75 ± 0.5*	17.75 ± 0.5*

† Los valores son promedio de cuatro plantas ± desviación estándar (DE); *Representa una diferencia significativa ($P < 0,05$).

Particularmente interesante es el resultado de la inoculación con el extracto en una concentración de 3 ml.L^{-1} , que reveló un aumento sustancial en la mayoría de los parámetros evaluados en comparación con la inoculación utilizando diferentes concentraciones del extracto y del control, como se detalla en la Tabla 5. Este hallazgo sugiere un efecto positivo y significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas cuando se utiliza esta concentración específica del extracto.

En las circunstancias actuales, la recuperación de suelos agrícolas se ha convertido en un objetivo pertinente. Para ello, la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento a la rizosfera de diferentes cultivos emerge como una estrategia efectiva que tiene el potencial de abordar los problemas agroambientales que enfrenta el mundo. La utilización de microorganismos promotores del crecimiento en la zona de las raíces de diversos cultivos se destaca como una estrategia altamente eficaz, con el potencial de abordar de manera efectiva los desafíos agroambientales que afectan a nivel global. Esta estrategia, que implica la inoculación selectiva de microorganismos beneficiosos en la rizosfera de los cultivos, no solo puede mejorar la salud del suelo, sino que también puede potenciar el crecimiento de las plantas, aumentar la absorción de nutrientes y fortalecer la resistencia a enfermedades y condiciones adversas. Además, tiene el potencial de contribuir significativamente a la sostenibilidad de la agricultura y la mitigación de impactos ambientales negativos, al tiempo que aumenta la productividad y la calidad de los cultivos (Pathania et al., 2023).

Las sustancias generadas por los microorganismos en la rizosfera, que promueven el crecimiento de las plantas, ejercen un efecto beneficioso tanto en la expansión como en la estructura de las plantas (de Andrade et al., 2023; Li et al., 2020). Las bacterias que favorecen el crecimiento y la salud de las plantas, conocidas como PGHPR, son responsables de la producción de fitohormonas, enzimas y biosurfactantes (Gouda et al., 2018; Pathania et al., 2023). En la interacción entre la planta y estos microorganismos, estas sustancias desempeñan un papel crucial al activar la disponibilidad de nutrientes, facilitar la colonización de las raíces y brindar protección contra agentes fitopatógenos. Además, las PGPR ayudan a las plantas a sobrellevar situaciones de estrés originadas por diversos factores ambientales no bióticos (Aloo et al., 2023). La formación de biopelículas por parte de las PGPR representa una estrategia de supervivencia más efectiva en comparación con el modo planctónico, especialmente en vista de las condiciones estresantes que prevalecen en la rizosfera.

4.3 Altura de la planta

El efecto de la aplicación del extracto enriquecido de pringamoza con bacterias promotoras del crecimiento vegetal, se evaluó a lo largo de un período de 90 días después del trasplante de las plantas de tomate. La introducción de estas bacterias en el extracto de pringamoza tuvo un impacto significativo y cuantificable en la altura de las plantas de tomate. La Figura 2 ilustra claramente esta influencia, mostrando un aumento sustancial en la altura de las plantas tratadas con T4, alcanzando 138.02 cm, en comparación con las plantas del grupo control que tenían una altura de 113.35 cm. Este incremento representó un notorio aumento de 24.67 cm. El tratamiento T3, que implicó una aplicación de 2 mL.L⁻¹, también generó un efecto positivo, con las plantas pasando de una altura de 113.35 cm en el grupo control a 125.05 cm, lo que representa un aumento de 11.7 cm, tal como se puede observar en la Figura 2. Por otro lado, el tratamiento T2, si bien produjo un incremento en la altura de las plantas, mostró resultados inferiores en comparación con T3 y T4. El análisis estadístico reveló que todos los tratamientos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.5$) en términos de la altura de las plantas de tomate en comparación con el grupo control. No obstante, el tratamiento T4 (3 mL.L⁻¹) destacó como el más efectivo entre los tratamientos evaluados, produciendo un aumento en la altura de las plantas superior al observado en los otros tratamientos.

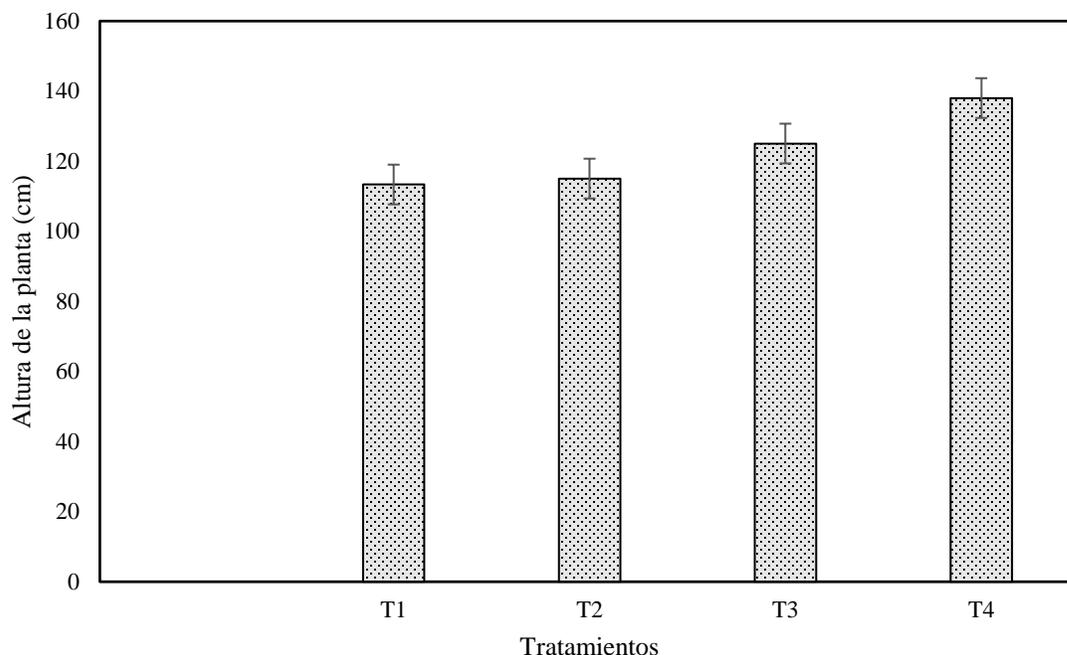


Figura 2. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable altura de la planta.

4.4 Numero de frutos por planta

La variable, número de frutos por planta, es un componente esencial en el estudio de la productividad de cultivos y desempeña un papel fundamental en la agricultura y la horticultura. Representa la cantidad de frutos que una planta específica puede producir en condiciones dadas, y su medición proporciona información valiosa sobre el rendimiento de las plantas. En la figura 3 se representa el comportamiento de la variable "número de frutos por planta" en función de los distintos tratamientos aplicados. Los resultados muestran un incremento significativo en la cantidad de frutos producidos. Es notable que, al aplicar el tratamiento T4, las plantas experimentaron un aumento sustancial en el número de frutos por planta, pasando de un promedio de (26.5 ± 1.0) frutos a (39.5 ± 0.58) frutos, lo que claramente señala un impacto positivo en el rendimiento del cultivo. El tratamiento T3 también mostró ser estadísticamente significativo ($p < 0.5$), con un promedio de (34.75 ± 0.50) frutos por planta, en comparación con el grupo de control. Por último, el tratamiento T2 también demostró ser significativo ($p < 0.5$), produciendo en promedio (33.2 ± 1.0) frutos por planta tras su aplicación. Estos resultados indican que la concentración del extracto de pringamoza influye de manera significativa en la producción de

frutos por planta, siendo los tratamientos T4, T3 y T2 eficaces en mejorar el rendimiento del cultivo en comparación con el grupo de control. Este hallazgo tiene implicaciones importantes en la agricultura, ya que sugiere que la optimización de la concentración de extracto de pringamoza puede ser una estrategia efectiva para aumentar la productividad de las plantas de interés.

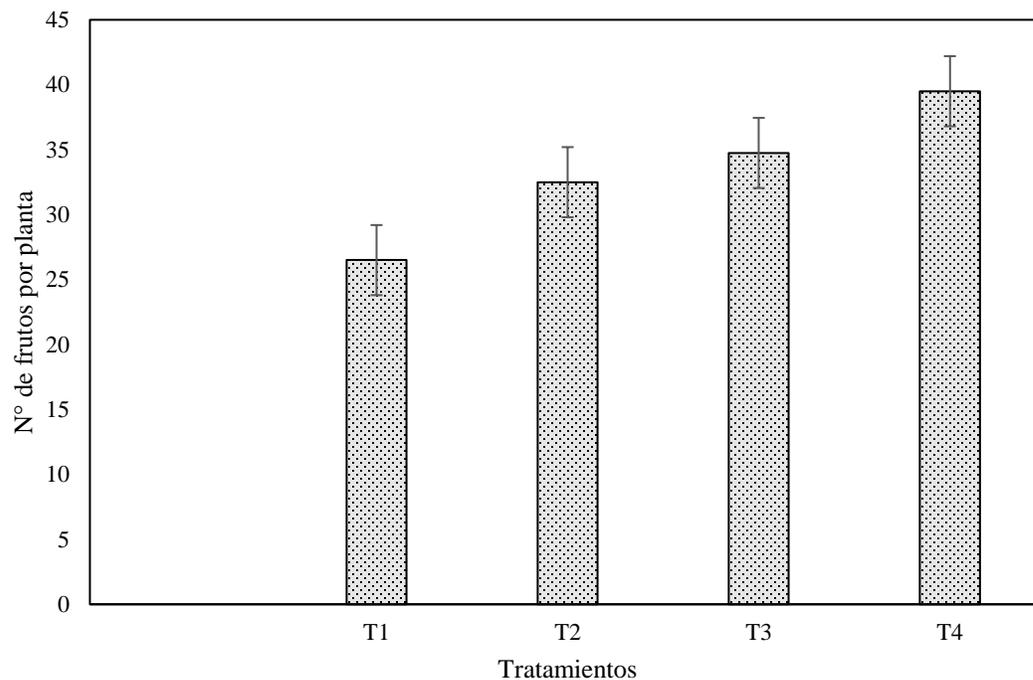


Figura 3. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable número de frutos por planta.

4.5 Número de racimos por planta

La variable "número de racimos por planta" es un elemento fundamental en la evaluación y análisis de la producción de tomate y otros cultivos hortícolas. Este indicador cuantifica la capacidad de una planta de tomate para desarrollar múltiples racimos de flores y, posteriormente, frutos. El número de racimos por planta es un reflejo directo de la productividad y calidad de la cosecha, ya que determina la cantidad de frutos que una planta puede generar. En este contexto, un mayor número de racimos por planta suele asociarse con una producción más abundante y, por ende, un mayor rendimiento. En el siguiente análisis, exploraremos cómo diferentes tratamientos afectan esta variable crucial, revelando las implicaciones prácticas de las decisiones agrícolas en la producción de tomate.

En la Figura 3, se presenta el análisis del comportamiento de la variable "número de racimos por planta" en relación a los diferentes tratamientos aplicados. Los datos reflejan claramente que la utilización del tratamiento T4 ha generado un aumento sustancial en el rendimiento, evidenciado por el significativo incremento en el número promedio de racimos por planta. Con la aplicación de T4 (3 mL.L^{-1}), la cantidad promedio de racimos por planta se eleva de 10.75 a 17.75, lo que representa un incremento altamente significativo en la producción de tomate cuando se empleó el extracto de pringamoza como biofertilizante. Por otro lado, el tratamiento T3 también ha demostrado un efecto positivo, con un promedio de 12.75 racimos por planta después de su aplicación. Esto supone un incremento de 4.0 racimos en comparación con el grupo control. Es importante destacar que el tratamiento T3 también muestra significancia estadística ($p < 0.05$). Sin embargo, es relevante señalar que su rendimiento, aunque significativo, es inferior en comparación con los tratamientos T3 y T4. Estos resultados enfatizan la efectividad del biofertilizante (extracto de pringamoza), particularmente los tratamientos T3 y T4, en la producción de tomate, con T4 destacándose como la opción más favorable en términos de incremento del número de racimos por planta.

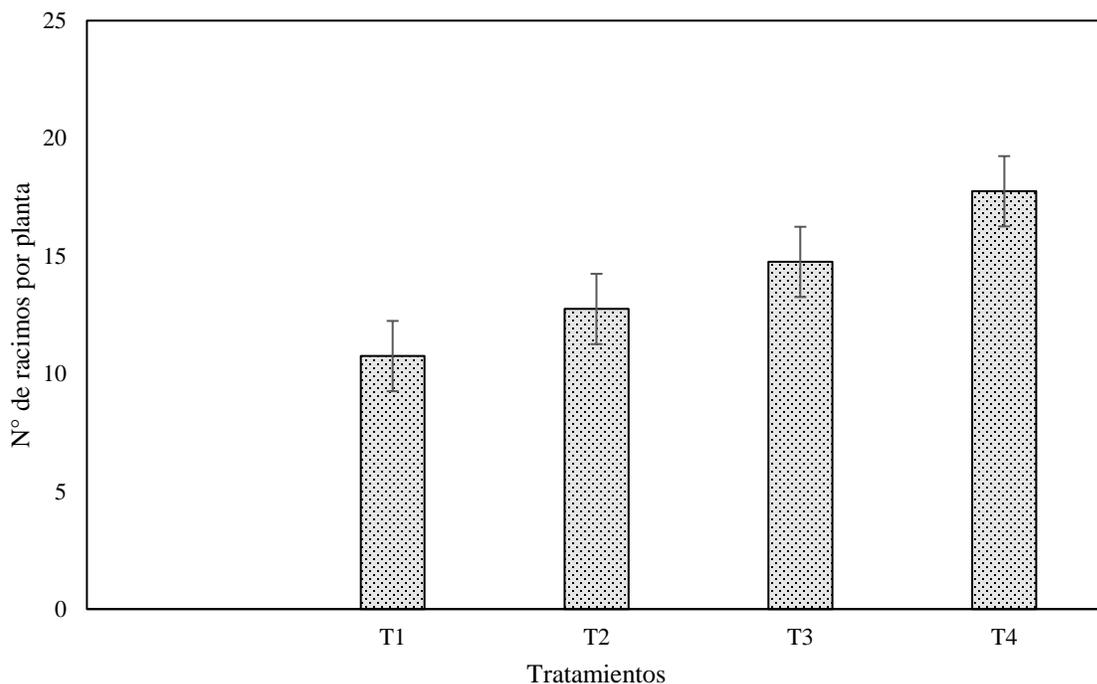


Figura 4. Efecto del extracto de pringamoza sobre la variable número de racimos por planta.

El proceso de promoción del crecimiento de las plantas comienza cuando las bacterias PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) competentes colonizan los entornos que rodean a las plantas (Bishnoi, 2015). Estas bacterias individuales se adhieren a la superficie de las plantas, experimentan divisiones celulares y proliferan, dando lugar a la formación de agregados densos comúnmente denominados microcolonias o biopelículas (Bhatia et al., 2021). En este punto, estas bacterias exhiben sus propiedades beneficiosas que tienen un impacto positivo en el crecimiento de las plantas. La quimiotaxis, o la respuesta direccional de las bacterias a gradientes químicos, desempeña un papel fundamental en el inicio de la interacción entre las plantas y estas bacterias beneficiosas. Las raíces de las plantas secretan diversos componentes que pueden atraer o repeler a los microorganismos (Yuan et al., 2015). Este proceso es en gran medida influenciado por rasgos bacterianos específicos, como la motilidad, la producción de material polimérico extracelular y la presencia de pili (apéndices filamentosos en las bacterias) que son esenciales para la unión y el establecimiento subsiguiente. Además de los factores bacterianos, existen otros elementos que influyen en este proceso, como la composición de los exudados de las raíces liberados por las plantas, la disponibilidad de agua, las características superficiales del tejido vegetal, las propiedades intrínsecas de las bacterias colonizadoras y las complejas interacciones entre el huésped, las PGPR y el entorno circundante (Dakora & Phillips, 2002). Es interesante observar que el comportamiento de colonización de estas bacterias también se ha encontrado que es más pronunciado en las puntas de las raíces en comparación con la base de las mismas, un hallazgo que concuerda con investigaciones previas (Pathania et al., 2020; Timmusk et al., 2005). Este fenómeno resalta la importancia de comprender en detalle cómo las PGPR interactúan con las plantas y sus raíces, ya que esta interacción desempeña un papel crucial en la promoción del crecimiento vegetal.

La evaluación del extracto de pringamoza con el propósito de promover su uso como cepas de PGPR (Rhizobacterias Promotoras del Crecimiento de Plantas) efectivas, se vuelve crucial al considerar su aplicación en el nicho rizosférico de las plantas. En la literatura científica, se han documentado numerosos informes que destacan la influencia de las PGPR en la rizosfera de diversas especies vegetales (Bhatia et al., 2008; Egamberdieva, 2010; Gupta et al., 2022; Jahanian et al., 2012; Pathania et al., 2020). Estos estudios han revelado un impacto significativo en una variedad de parámetros relacionados con el desarrollo de las plantas, tales como la altura de la planta, el número de frutos y racimos por planta. Asimismo, se han observado mejoras notables en

la altura de las plantas, lo cual constituye un indicio claro de la influencia positiva ejercida por estos inoculantes de PGPR. En última instancia, la evaluación y promoción de extractos como el de pringamoza, enriquecido con cepas específicas de PGPR en el contexto de la rizosfera de las plantas no solo es esencial para comprender su capacidad para mejorar los parámetros de crecimiento y vigor de las plantas, sino que también sienta las bases para su aplicación práctica en la agricultura y la horticultura, donde pueden desempeñar un papel fundamental en la mejora de los rendimientos y la salud de los cultivos.

5. Conclusiones

El extracto exhibió una concentración notable de bacterias con capacidad de fijación de nitrógeno, destacándose por múltiples características propicias para el crecimiento vegetal, como la producción de Ácido Indol Acético (IAA) y amonio. Estas propiedades distinguen al extracto como un candidato prometedor en el ámbito agrícola, subrayando su potencial para desempeñar un papel significativo en la mejora tanto de la productividad como de la salud de los cultivos.

El extracto evaluado presentó una notable concentración de bacterias con capacidad para solubilizar fósforo. Esta característica particular señala el alto potencial del extracto de pringamoza como biofertilizante, indicando beneficios para potenciar el rendimiento de los cultivos y presentando una estrategia efectiva para mejorar la fertilidad del suelo.

La aplicación del extracto de pringamoza emerge como una estrategia eficaz para impulsar el crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate, al mismo tiempo que posibilita la reducción de los costos relacionados con los fertilizantes. Este enfoque constituye un paso significativo hacia la mejora de la calidad y seguridad alimentaria.

6. Recomendaciones

- Evaluar el extracto en un cultivo de tomate en condiciones de campo.
- Utilizar plantas modelo de otro tipo de hortaliza para evaluar la eficacia del extracto de pringamoza con actividad biofertilizante in-vitro, ya que los microorganismos podrían tener preferencia o especificidad hacia ciertas especies.
- Evaluar el extracto de pringamoza utilizando distintos tipos de suelo, debido que la afinidad o adaptación de los microorganismos a diferentes sustratos puede variar significativamente.

7. Referencias bibliográficas

- Aguilar-Piedras, J. J., Xiqui-Vásquez, M. L., García-García, S., & Baca, B. E. (2008). Indole-acetic acid production in *Azospirillum* | Producción del ácido indol-3-acético en *Azospirillum*. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 50(1–2), 29–37. https://www.researchgate.net/profile/Beatriz-Baca/publication/287473721_Indole-acetic_acid_production_in_Azospirillum/links/5681538608ae1975838f77a5/Indole-acetic-acid-production-in-Azospirillum.pdf
- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, 163(2), 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.04.001>
- Almaghrabi, O. A., Massoud, S. I., & Abdelmoneim, T. S. (2013). Influence of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on tomato plant growth and nematode reproduction under greenhouse conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.10.004>
- Alonso-Salinas, R., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., Noguera-Artiaga, L., Carbonell-Barrachina, Á. A., Núñez-Delicado, E., & Acosta-Motos, J. R. (2022). Novel combination of ethylene oxidisers to delay losses on postharvest quality, volatile compounds and sensorial analysis of tomato fruit. *LWT*, 170, 114054. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.114054>
- Aloo, B. N., Dessureault-Rompré, J., Tripathi, V., Nyongesa, B. O., & Were, B. A. (2023). Signaling and crosstalk of rhizobacterial and plant hormones that mediate abiotic stress tolerance in plants. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 14). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1171104>
- Anwarzai, N., Kattagoudar, J., Anjanappa, M., Sood, M., Reddy, A., & Kumar, S. M. (2020). Evaluation of Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme*) Genotypes for Yield and Quality Parameters. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(3), 467–472. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.903.054>
- Bashan, Y. (1998). Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. In

Biotechnology Advances (Vol. 16, Issue 4, pp. 729–770). Elsevier Sci Ltd.
[https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00003-2)

Bhatia, R., Gulati, D., & Sethi, G. (2021). Biofilms and nanoparticles: applications in agriculture. In *Folia Microbiologica* (Vol. 66, Issue 2, pp. 159–170). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s12223-021-00851-7>

Bhatia, R., Ruppel, S., & Narula, N. (2008). Diversity studies of *Azotobacter* spp. from cotton-wheat cropping systems of India. *Journal of Basic Microbiology*, 48(6), 455–463. <https://doi.org/10.1002/jobm.200800059>

Bishnoi, U. (2015). PGPR Interaction: An Ecofriendly Approach Promoting the Sustainable Agriculture System. *Advances in Botanical Research*, 75, 81–113. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2015.09.006>

Bouabid, K., Lamchouri, F., Toufik, H., & Faouzi, M. E. A. (2020). Phytochemical investigation, in vitro and in vivo antioxidant properties of aqueous and organic extracts of toxic plant: *Atractylis gummifera* L. In *Journal of Ethnopharmacology* (Vol. 253, p. 112640). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112640>

Brunel, C., Pouteau, R., Dawson, W., Pester, M., Ramirez, K. S., & van Kleunen, M. (2020). Towards Unraveling Macroecological Patterns in Rhizosphere Microbiomes. In *Trends in Plant Science* (Vol. 25, Issue 10, pp. 1017–1029). <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.04.015>

Chacón-Pacheco, J., Viloría-Rivas, J., & Ramos-Madera, C. (2017). Murciélagos asociados al campus de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 9(1), 25–30. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.n1.2017.494>

Chang, C. H., & Yang, S. S. (2009). Thermo-tolerant phosphate-solubilizing microbes for multi-functional biofertilizer preparation. *Bioresource Technology*, 100(4), 1648–1658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.009>

Chaves-Bedoya, G., & Ortiz-Rojas, L. Y. (2022). Estudio fitoquímico de *Cnidioscolus urens* (L.) Arthur procedente de la región de Cúcuta (Colombia). *Información Tecnológica*, 33(6), 21–30. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000600021>

- Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010a). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. In *Soil Biology and Biochemistry* (Vol. 42, Issue 5, pp. 669–678). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
- Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010b). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. In *Soil Biology and Biochemistry* (Vol. 42, Issue 5, pp. 669–678). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
- Dakora, F. D., & Phillips, D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. In *Food Security in Nutrient-Stressed Environments: Exploiting Plants' Genetic Capabilities* (pp. 201–213). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1570-6_23
- de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. In *Microorganisms* (Vol. 11, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- Dennis, P. G., Miller, A. J., & Hirsch, P. R. (2010). Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? In *FEMS Microbiology Ecology* (Vol. 72, Issue 3, pp. 313–327). <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x>
- Dodd, I. C., Zinovkina, N. Y., Safronova, V. I., & Belimov, A. A. (2010). Rhizobacterial mediation of plant hormone status. In *Annals of Applied Biology* (Vol. 157, Issue 3, pp. 361–379). <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00439.x>
- Egamberdieva, D. (2010). Growth response of wheat cultivars to bacterial inoculation in calcareous soil. *Plant, Soil and Environment*, 56(12), 570–573. <https://doi.org/10.17221/75/2010-pse>
- El Khetabi, A., El Ghadraoui, L., Ouaabou, R., Ennahli, S., Barka, E. A., & Lahlali, R. (2023). Antifungal activities of aqueous extracts of moroccan medicinal plants against *Monilinia* spp. agent of brown rot disease. *Journal of Natural Pesticide Research*, 5, 100038.

<https://doi.org/10.1016/J.NAPERE.2023.100038>

- FAOSTAT. (2022). *FAOSTAT*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación, 2022. Producción de Yuca En Todos Los Países, 1961–2020. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Feng, X., Ray, P. P., Jarrett, J. P., Karpinski, L., Jones, B., & Knowlton, K. F. (2018). Short communication: Effect of abomasal inorganic phosphorus infusion on phosphorus absorption in large intestine, milk production, and phosphorus excretion of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, *101*(8), 7208–7211. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14515>
- Figueira, J., Câmara, H., Pereira, J., & Câmara, J. S. (2014). Evaluation of volatile metabolites as markers in *Lycopersicon esculentum* L. cultivars discrimination by multivariate analysis of headspace solid phase microextraction and mass spectrometry data. *Food Chemistry*, *145*, 653–663. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.061>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., & Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, *2017*(93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/ig.54706>
- Gil, R., Bojacá, C. R., & Schrevers, E. (2019). Understanding the heterogeneity of smallholder production systems in the Andean tropics – The case of Colombian tomato growers. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, *88*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.02.002>
- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H. S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. In *Microbiological Research* (Vol. 206, pp. 131–140). <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Gupta, R., Kumari, A., Sharma, S., Alzahrani, O. M., Noureldeen, A., & Darwish, H. (2022). Identification, characterization and optimization of phosphate solubilizing rhizobacteria (PSRB) from rice rhizosphere. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *29*(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.075>
- Gutiérrez-Santa Ana, A., Carrillo-Cerda, H. A., Rodríguez-Campos, J., Kirchmayr, M. R.,

- Contreras-Ramos, S. M., & Velázquez-Fernández, J. B. (2020). Volatile emission compounds from plant growth-promoting bacteria are responsible for the antifungal activity against *F. solani*. *3 Biotech*, *10*(7). <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02290-6>
- Hellal, F., & Mahfouz, S. (2011). Partial substitution of mineral nitrogen fertilizer by bio-fertilizer on (*Anethum graveolens* L.) plant. *Agriculture and Biology Journal of North America*, *2*(4), 652–660. <https://doi.org/10.5251/abjna.2011.2.4.652.660>
- Jahanian, A., Chaichi, M., & Rezaei, K. (2012). The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Germination and Primary Growth of Artichoke (*Cynara scolymus*). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 923–929. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123364547>
- Jiménez-Arellanes, M. A., García-Martínez, I., & Rojas-Tomé, S. (2014). Potencial biológico de especies medicinales del género *Cnidocolus* (Euphorbiaceae). *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, *45*(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952014000400003
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2009). Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. In *Sustainable Agriculture* (pp. 551–570). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34
- Kochar, M., & Srivastava, S. (2012). Surface colonization by *Azospirillum brasilense* SM in the indole-3-acetic acid dependent growth improvement of sorghum. *Journal of Basic Microbiology*, *52*(2), 123–131. <https://doi.org/10.1002/jobm.201100038>
- Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H. S., & Saxena, A. K. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. In *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (Vol. 23). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>
- Lambers, H., Mougél, C., Jaillard, B., & Hinsinger, P. (2009). Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: An evolutionary perspective. In *Plant and Soil* (Vol. 321, Issues 1–2, pp. 83–115). <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0042-x>
- Lara, M. C., García, T. L. P., & Oviedo, Z. L. E. (2010). Medio de cultivo utilizando residuos-

- sólidos para el crecimiento de una bacteria nativa con potencial biofertilizante Using a solid waste culture medium for growing a native strain having biofertiliser potential. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(1), 103–112. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-34752010000100011&script=sci_arttext
- Lara, M. C., Villalba, A. M., & Oviedo, Z. L. E. (2008). Bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno de la zona agrícola de San Carlos. Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 9(2), 6–14. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/711>
- Li, H., Qiu, Y., Yao, T., Ma, Y., Zhang, H., & Yang, X. (2020). Effects of PGPR microbial inoculants on the growth and soil properties of *Avena sativa*, *Medicago sativa*, and *Cucumis sativus* seedlings. *Soil and Tillage Research*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104577>
- Li, Z., Wang, Y., Liu, Z., Han, F., Chen, S., & Zhou, W. (2023). Integrated application of phosphorus-accumulating bacteria and phosphorus-solubilizing bacteria to achieve sustainable phosphorus management in saline soils. *Science of The Total Environment*, 885, 163971. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163971>
- Licker, R., Johnston, M., Foley, J. A., Barford, C., Kucharik, C. J., Monfreda, C., & Ramankutty, N. (2010). Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 769–782. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00563.x>
- Machaca, M. L. (2017). *Bacterias solubilizadoras de fosfato del género Bacillus en suelos de la provincia de El Collao (Puno) y su efecto en la germinación y crecimiento de quinua*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_b63d597c3fe9f55a697194a713ea52df
- Mamta, Rahi, P., Pathania, V., Gulati, A., Singh, B., Bhanwra, R. K., & Tewari, R. (2010). Stimulatory effect of phosphate-solubilizing bacteria on plant growth, stevioside and rebaudioside-A contents of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Applied Soil Ecology*, 46(2), 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.008>
- Marques, A. P. G. C., Pires, C., Moreira, H., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2010). Assessment of the plant growth promotion abilities of six bacterial isolates using *Zea mays*

- as indicator plant. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8), 1229–1235. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.014>
- Marschner, P., Yang, C. H., Lieberei, R., & Crowley, D. E. (2001). Soil and plant specific effects on bacterial community composition in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(11), 1437–1445. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00052-9)
- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G., & Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by Rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293–319. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100006>
- Matias, S. R., Pagano, M. C., Muzzi, F. C., Oliveira, C. A., Carneiro, A. A., Horta, S. N., & Scotti, M. R. (2009). Effect of rhizobia, mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere of native plants used to recover an iron ore area in Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 45(3), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.02.003>
- Palacio-Rodríguez, R., Nava-Reyes, B., Sánchez-Galván, H., Quezada-Rivera, J. J., & Sáenz-Mata, J. (2022). Efecto de la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal de tomate en condiciones de casa sombra comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 231–242. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3278>
- Pathania, P., Bhatia, R., & Khatri, M. (2020). Cross-competence and affectivity of maize rhizosphere bacteria *Bacillus* sp. MT7 in tomato rhizosphere. *Scientia Horticulturae*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109480>
- Pathania, P., Gulati, D., Setia, H., & Bhatia, R. (2023). Characterization and performance evaluation of plant growth promoting bacteria in tomato rhizosphere. *South African Journal of Botany*, 161, 388–394. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.037>
- Pérez, E., Sulbarán, M., Ball, M. M., & Yarzabal, L. A. (2007). Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the southeastern Venezuelan region. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2905–2914. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.017>

- Pérez, F. L. P., & Oviedo, Z. L. E. (2019). CARACTERIZACIÓN DE BACTERIAS NATIVAS CON POTENCIAL BIOFERTILIZANTE AISLADAS DE SUELOS DEL DEPARTAMENTO DE SUCRE. In *Biotechnología aplicada al sector agropecuario en el departamento de Sucre*. <https://doi.org/10.21892/9789585547063.11>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & Van Der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 11, Issue 11, pp. 789–799). <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Poonguzhali, S., Madhaiyan, M., & Sa, T. (2007). Quorum-sensing signals produced by plant-growth promoting Burkholderia strains under in vitro and in planta conditions. *Research in Microbiology*, 158(3), 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2006.11.013>
- Reyes, I., Alvarez, L., El-Ayoubi, H., & Valery, A. (2008). Selección y evaluación de rizobacterias promotoras del crecimiento en pimentón y maíz. *Bioagro*, 20(1). http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-33612008000100005&script=sci_arttext
- Ryu, R. J., & Patten, C. L. (2008). Aromatic amino acid-dependent expression of indole-3-pyruvate decarboxylase is regulated by tyrr in *Enterobacter cloacae* UW5. *Journal of Bacteriology*, 190(21), 7200–7208. <https://doi.org/10.1128/JB.00804-08>
- Saravanakumar, D., Vijayakumar, C., Kumar, N., & Samiyappan, R. (2007). PGPR-induced defense responses in the tea plant against blister blight disease. *Crop Protection*, 26(4), 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.05.007>
- Sasse, J., Martinoia, E., & Northen, T. (2018). Feed Your Friends: Do Plant Exudates Shape the Root Microbiome? In *Trends in Plant Science* (Vol. 23, Issue 1, pp. 25–41). <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>
- Schneijderberg, M., Cheng, X., Franken, C., de Hollander, M., van Velzen, R., Schmitz, L., Heinen, R., Geurts, R., van der Putten, W. H., Bezemer, T. M., & Bisseling, T. (2020). Quantitative comparison between the rhizosphere effect of *Arabidopsis thaliana* and co-occurring plant species with a longer life history. *ISME Journal*, 14(10), 2433–2448. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-0695-2>
- Shang, X. chao, Zhang, M., Zhang, Y., Hou, X., & Yang, L. (2023). Waste seaweed compost and

- rhizosphere bacteria *Pseudomonas koreensis* promote tomato seedlings growth by benefiting properties, enzyme activities and rhizosphere bacterial community in coastal saline soil of Yellow River Delta, China. *Waste Management*, 172, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.003>
- Shilev, S. (2020). Plant-growth-promoting bacteria mitigating soil salinity stress in plants. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 20, pp. 1–20). <https://doi.org/10.3390/app10207326>
- Singh, J. S., Pandey, V. C., & Singh, D. P. (2011). Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 140, Issues 3–4, pp. 339–353). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
- Solís, S., Contreras-Ramos, S. M., Bacame-Valenzuela, F. J., Reyes-Vidal, Y., González-Jasso, E., & Bustos, E. (2023). Comparison of the effects of biological and electrical stimulation on the growth of *Zea mays*. *Electrochimica Acta*, 448, 142193. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142193>
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. In *FEMS Microbiology Reviews* (Vol. 31, Issue 4, pp. 425–448). <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x>
- Sriwati, R., Maulidia, V., Intan, N., Oktarina, H., Syamsuddin, Khairan, K., Skala, L., & Mahmud, T. (2023). Endophytic bacteria as biological agents to control fusarium wilt disease and promote tomato plant growth. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 125, 101994. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.101994>
- Sukumar, P., Legué, V., Vayssières, A., Martin, F., Tuskan, G. A., & Kalluri, U. C. (2013). Involvement of auxin pathways in modulating root architecture during beneficial plant-microorganism interactions. *Plant, Cell and Environment*, 36(5), 909–919. <https://doi.org/10.1111/pce.12036>
- Tejera-Hernández, B., Heydrich-Pérez, M., & Rojas-Badía, M. M. (2013). Aislamiento de *Bacillus* solubilizadores de fosfatos asociados al cultivo del arroz. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 357. <https://doi.org/10.15517/am.v24i2.12535>

- Timmusk, S., Grantcharova, N., & Wagner, E. G. H. (2005). *Paenibacillus polymyxa* invades plant roots and forms biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(11), 7292–7300. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7292-7300.2005>
- Trujillo, M. ., Pedraza, R., Abud, Y. ., & Ochoa, M. . (2013). Perspectivas del Empleo de Rizobacterias Como Agentes de Control Biológico en Cultivos de Importancia Económica. *Revista Biológicas*, 12(1), 65–71. <https://www.redalyc.org/pdf/612/61224107.pdf>
- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K. E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K. D., Smaling, E. M. A., Woomer, P. L., & Sanginga, N. (2010). Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture*, 39(1), 17–24. <https://doi.org/10.5367/000000010791169998>
- Wang, Z. J., Li, X., Wang, J. H., Qi, S. S., Dai, Z. C., & Du, D. L. (2022). Effect of nitrogen-fixing bacteria on resource investment of the root system in an invasive clonal plant under low nutritional environment. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 297, 152166. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152166>
- Widnyana, I. K., & Javandira, C. (2016). Activities *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* sp. to Stimulate Germination and Seedling Growth of Tomato Plants. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 419–423. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.158>
- Woodward, A., Botany, B. B.-A. of, & 2005, U. (2005). Auxin: regulation, action, and interaction. *Academic.Oup.ComAW Woodward, B BartelAnnals of Botany, 2005•academic.Oup.Com.* <https://academic.oup.com/aob/article-abstract/95/5/707/201283>
- Yepes, E. J. A. (2014). *EFEECTO DE LA INOCULACIÓN DE BACTERIAS NATIVAS SOBRE EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE PLANTAS DE AJÍ (Capsicum annuum L.) EN CONDICIONES DE UMBRÁCULO*. Universidad de Córdoba.
- Yuan, J., Zhang, N., Huang, Q., Raza, W., Li, R., Vivanco, J. M., & Shen, Q. (2015). Organic acids from root exudates of banana help root colonization of PGPR strain *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6. *Scientific Reports*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep13438>
- Zhang, G., Shi, L., Liu, C., Huang, Z., Zheng, Y., & Dong, L. (2023). Rhizosphere effects on the

microbial community: Specificity and conservatism across geographically disjunct *Panax* species. *Applied Soil Ecology*, 192, 105075. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105075>

Zhu, U., Wang, S., Huang, Z., Zhang, S., Liao, Q., Zhang, C., Lin, T., Qin, M., Peng, M., Yang, C., Cao, X., Han, X., Wang, X., van der Knaap, E., Zhang, Z., Cui, X., Klee, H., Fernie, A. R., Luo, J., & Huang, S. (2018). Rewiring of the Fruit Metabolome in Tomato Breeding. *Cell*, 172(1–2), 249-261.e12. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.019>

ANEXOS

Anexo 1. Extracto de pringamoza



Anexo 2. cultivo de tomate en condiciones de invernadero.



Anexo 3. Análisis estadístico.

Tabla 1. Totales y promedios para la variable altura de la planta.

% (concentraciones)	Repeticiones				Totales Y_j	promedios \bar{Y}_j
	1	2	3	4		
control	113,4	112,5	113,7	113,8	453,4	113,35
1 ml	114,3	114,7	115,9	115,3	460,2	115,05
2 ml	125,4	123,6	125,7	125,5	500,2	125,05
3 ml	138,6	138,5	137,9	137,1	552,1	138,025
				Y..	1965,9	122,86875

Teniendo un total de 4 tratamientos cada uno con 4 repeticiones lo que da un total de 16 unidades experimentales.

Las sumas de cuadrados requeridas para el análisis de varianza se calculan de la siguiente manera:

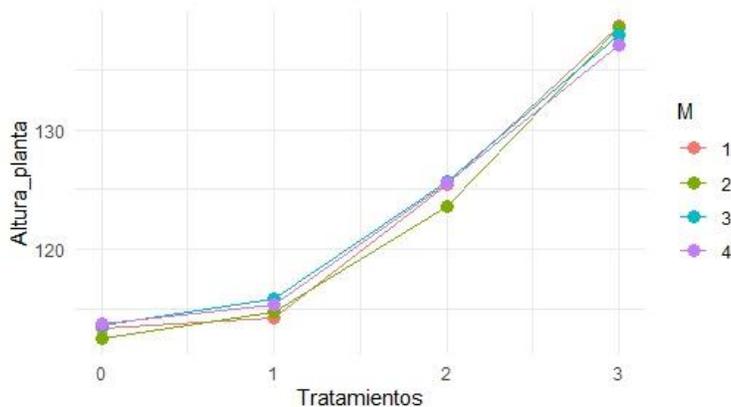
$$SC_{total} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{n} = ((113,4)^2 + (112,5)^2 + \dots + (137,1)^2) - \frac{(1965,9)^2}{16} = 1551,63$$

$$SC_{tto} = \sum_{j=1}^4 \frac{Y_j^2}{r_j} - \frac{Y^2}{n} = \left(\frac{453,4^2}{4} + \frac{460,2^2}{4} + \dots + \frac{552,1^2}{4} \right) - \frac{(1965,9)^2}{16} = 1544,84$$

$$SC_{ee} = SC_{total} - SC_{tto}$$

$$SC_{ee} = 1551,63 - 1544,84 = 6,80$$

Figura 1.



De la Figura 1 es notable que para los 4 tratamientos, incluyendo el control, la dosis optima se obtiene cuando a la planta se le aplica la concentración de 3 ml, para las 4 repeticiones se observa el mismo comportamiento.

Teniendo en cuenta la Tabla 2 con un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, por tanto, se concluye que existen diferencias significativas entre los niveles del factor estudiado.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_4$$

H1: Al menos una media de tratamiento es diferente.

Tabla 2. Análisis de varianza para la variable altura de la planta.

ANOVA					
FV	GL	SC	CM	FC	Pvalor
TTO	3	1544,83687	514,95	909,06	2,0692e-14
EE	12	6,80	0,57		
TOTAL	15	1551,63			

Por tanto, se procede a realizar el análisis por coeficientes de polinomios ortogonales para la variable dependiente altura de la planta, con diferentes concentraciones igualmente espaciadas.

Tabla 4. ANOVA para altura de la planta

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pvalor
TTO	3,00	1544,84	514,95	908,73	2,073691e-14
Efecto lineal	1,00	1412,54	1412,54	2492,73	2,733423e-15
Efecto cuadrático	1,00	127,24	127,24	224,54	9,651037e-08
Efecto cubico	1,00	5,66	5,66	9,99	0,03468843
EE	12,00	6,80	0,57		

Con las sumas de cuadrados se procede a realizar el análisis de varianza para obtener los efectos que entran en el modelo como se muestra en la Tabla 4 donde teniendo en cuenta un nivel de significancia del 5% se concluye que la relación entre la altura de la planta y los ml de concentración agregados es lineal, cuadrática y cúbica, ya que estos efectos resultaron estadísticamente significativos, es decir que el polinomio según los resultados del ANOVA es:

$$\hat{Y} = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 P_1(x) + \hat{\alpha}_2 P_2(x) + \hat{\alpha}_3 P_3(x) \quad (1)$$

Con los resultados de la Tabla 4 se pueden estimar los parámetros $\hat{\alpha}_k$ del polinomio, aplicando las expresiones correspondientes dadas anteriormente, con lo cual se

se llega a:

$$\hat{Y} = -0,8875 x^3 + 6,8125 x^2 - 4,225x + 113,35125 \quad (2)$$

Ahora, para encontrar la dosis optima se aplican los conceptos de máximos y mínimos del cálculo diferencial, así derivando la función anterior con respecto a x e igualando esta derivada a cero se obtiene: los puntos críticos, y aplicando segunda derivada

$\frac{d^2 \hat{Y}}{dx^2} |_{x=4,7858} = -5,325 (4,7858) + 13,625 = -11.86 < 0$, por lo tanto en $x = 4,7858$ existe un máximo relativo.

Llegando así a la conclusión que la **dosis optima es 3ml**, puesto que es la que presenta mejor comportamiento.

Prueba de Dunnett

Luego es necesario comparar los tratamientos con el control por lo que se realiza **la prueba de Dunnett**

Donde se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_j = \mu_t$$

$$H_1: \mu_j \neq \mu_t ; \text{ para } j= 1, \dots, t-1.$$

Tenemos:

$$t=4$$

$$t-1=3$$

$$v = g_l e = 12$$

$$r=4$$

Se plantea el Estadístico

$$d_{\alpha}(t-1, v) \sqrt{\frac{2 CME}{r}}$$

Con un nivel de significancia del 5%, $d_{0,05}(3, 12) = 2,50$ (valor obtenido de la tabla de Dunnett).

Luego, reemplazando:

$$2,50 * \sqrt{\frac{2(0,57)}{4}} = 1,3346$$

En consecuencia, un tratamiento debe considerarse significativamente diferente del control si la diferencia de medias en valor absoluto es mayor a 1,3346.

Tabla 6. Prueba de Dunnett.

Comparación	$\bar{Y}_j - \bar{Y}_1$	$ \bar{Y}_j - \bar{Y}_1 $	Conclusión
T2 – T1(control)	115,05 – 113,35	1,7	1,7 > 1,3346
T3 – T1(control)	125,05 – 113,35	11,7	11,7 > 1,3346
T4 – T1(control)	138,025 – 113,35	24,675	24,675 > 1,3346

Finalmente, de acuerdo con la Tabla 6 todos los tratamientos presentan diferencias significativas con el control; pero cabe resaltar que la diferencia del tratamiento cuatro (dosis 3ml) en cuanto al tratamiento 1(control), es mucho más notable, confirmando lo dicho anteriormente en la Figura 1 y los resultados de los polinomios ortogonales.

Tabla 7: Resumen de las variables y repeticiones

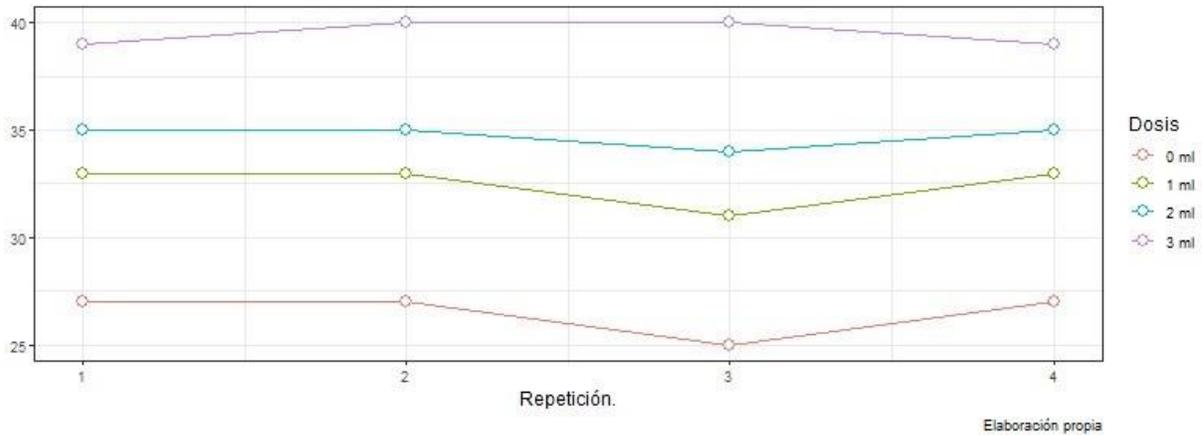
Tratamientos	Repetición	N° DE FRUTOS POR PLANTA	N° DE RACIMOS POR PLANTA
T1 (Control)	1	27	11
	2	27	10
	3	25	11
	4	27	11
T2 (1 ml)	1	33	13
	2	33	12
	3	31	13
	4	33	13
T3 (2 ml)	1	35	15
	2	35	14
	3	34	15
	4	35	15
T4 (3 ml)	1	39	17
	2	40	18
	3	40	18

	4	40	18
--	---	----	----

Número de frutos por plantas

En la Figura 2 se muestra el número de frutos por plantas en diferentes concentraciones en mL. L-1 de extracto, con 4 repeticiones para cada concentración

Figura 2: Número de frutos por plantas



Ahora, las hipótesis a contrastar serían:

H_0 : Las medias de las concentraciones son iguales.

H_1 : Al menos una de las medias de las concentraciones es distintas.

Tabla 8: Tabla de Anava de Número de frutos por planta

F.V	Gl	SC	CM	F	Pvalor
TTO	3	349,6875	116,5625	180,483871	$3,0185 \times 10^{-10}$
Error	12	7,75	0,64583333		
Total	15	357,4375			

Los resultados de la Tabla 8 muestran que el p.valor es $3,0185 \times 10^{-10}$ (cercano a cero), el cual es menor que el nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para

rechazar la hipótesis nula H_0 y se puede concluir que hay diferencias significativas entre los niveles de concentración estudiados

Tabla 9: Prueba Dunnett

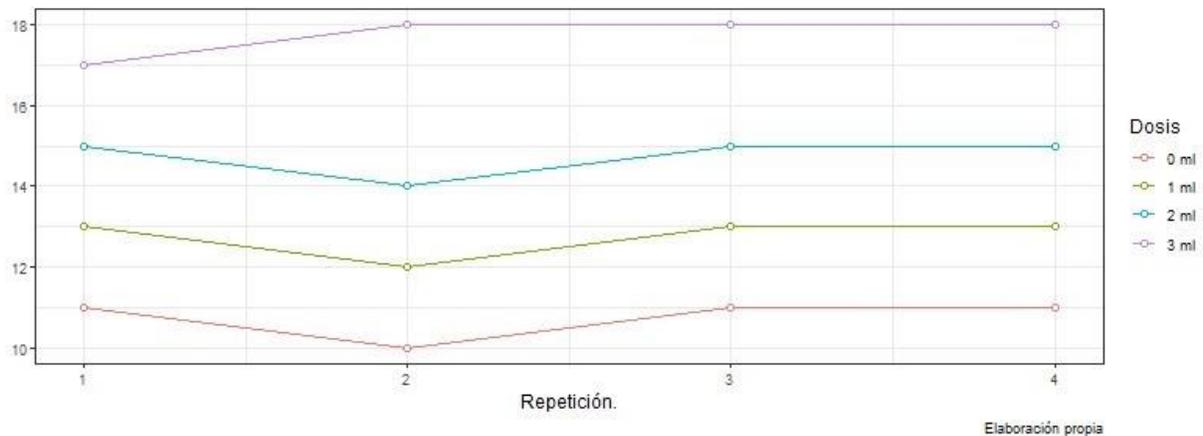
Comparación	$ Y_{.j} - Y_{.1} $	D
T4 contra T1	13	1,5229*
T3 contra T1	8,25	1,5229*
T2 contra T1	6	1,5229*

De los resultados, se puede concluir que la máxima cantidad de frutos se obtiene para la dosis alrededor de 2,73 ml L-1 de extracto y la mínima cantidad de frutos se obtiene con dosis cercanas a 0.264 ml L-1 de extracto, es decir, la dosis óptima es la de 3ml.

Número de racimos por plantas

En la Figura 3 se muestra el número de racimos por plantas en diferentes concentraciones en mL L-1 de extracto, con 4 repeticiones para cada concentración

Figura 3: Número de racimos por plantas



Ahora, las hipótesis a contrastar serían:

H_0 : Las medias de las concentraciones son iguales.

H_1 : Al menos una de las medias de las concentraciones es distintas.

Tabla 10: Tabla de Anava de número de racimos por planta

F.V	Gl	SC	CM	F	Pvalor
TTO	3	107	35,66666667	142,6666667	$1,19259 \times 10^{-9}$
Error	12	3	0,25		
Total	15	110			

Los resultados de la Tabla 10 muestran que el p.valor es $1,19259 \times 10^{-9}$ (cercano a cero), el cual es menor que el nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula H_0 y se puede concluir que hay diferencias significativas entre los niveles de concentración estudiados.

Tabla 11: Prueba Dunnett

Comparación	$ Y_{.j} - Y_{.1} $	D
T4 contra T1	7	0,95*
T3 contra T1	4	0,95*
T2 contra T1	2	0,95*

Como solo es significativo el efecto lineal, se puede decir que a medida que se incrementa la dosis de manera lineal en los tratamientos, también se observa un aumento lineal en el número de racimos por planta, es decir, la mejor dosis es la de 3 ml (tratamiento 4).