

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**INOCULACIÓN DE COMPOST CON BACTERIAS BENÉFICAS: EFECTO EN EL
CRECIMIENTO DE CILANTRO (*CORIANDRUM SATIVUM* L.) Y EN SU
TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO**

POR

JOSÉ PATRICIO ARÉVALO BUSTOS

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2023**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**INOCULACIÓN DE COMPOST CON BACTERIAS BENÉFICAS: EFECTO EN EL
CRECIMIENTO DE CILANTRO (*CORIANDRUM SATIVUM* L.) Y EN SU
TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO**

POR

JOSÉ PATRICIO ARÉVALO BUSTOS

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2023**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Macarena Gerding G.
Ing. Agrónomo, Ph.D.

Guía

Profesor Asociado, María Cristina Muñoz V.
Ing. Agrónomo, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Arturo Calderón O.
Ing. Agrónomo, Ph.D.

Asesor

Investigadora externa, María Cecilia Céspedes L.
Ing. Agrónomo, M. Sc.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary.....	1
Introducción	2
Materiales y Métodos	4
Resultados y Discusión	8
Conclusiones	19
Referencias	19

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Población bacteriana de las cepas <i>Pseudomonas</i> AG-97 y <i>Bacillus</i> AG-98 sobre sustrato de compost mantenidas en incubación a 25°C durante 3 meses (A) inoculadas por separado (B) inoculadas en mezcla	9
Figura 2	Efecto de <i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla, sobre el peso seco de raíces de cilantro en diferentes condiciones de reposición hídrica (100, 70 y 40%)	11
Figura 3	Efecto de <i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla sobre la proporción de peso seco de raíces de cilantro bajo diferentes niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%).....	12
Figura 4	Efecto del nivel de reposición de lámina de agua sobre el peso seco aéreo de cilantro.....	13
Figura 5	Efecto de <i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla sobre peso seco aéreo de cilantro	14
Figura 6	Efecto del nivel de reposición de lámina de agua sobre el volumen de raíces de cilantro.....	15
Figura 7	Efecto de <i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla, sobre el volumen de la raíz de cilantro.....	16
Figura 8	Relación entre potencial hídrico de la hoja y peso seco aéreo del cilantro con diferentes tratamientos de inoculación de compost (<i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc)) y niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%)	17
Figura 9	Relación entre potencial hídrico de la hoja y peso seco	

de raíces con diferentes tratamientos de inoculación de compost (<i>Pseudomonas</i> AG-97 (Ps) y <i>Bacillus</i> AG-98 (Bc)) y niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%)	18
---	----

INOCULACIÓN DE COMPOST CON BACTERIAS BENÉFICAS: EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE CILANTRO (*CORIANDRUM SATIVUM* L.) Y LA TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO

COMPOST INOCULATION WITH BENEFICIAL BACTERIA: EFFECT ON CORIANDER (*CORIANDRUM SATIVUM* L.) GROWTH AND WATER DEFICIT TOLERANCE

Palabras índice adicionales: PGPR, ácido indolacético (AIA), ACC-desaminasa.

RESUMEN

Las demandas por una agricultura más sostenible, sumado a la crisis climática que genera sequías prolongadas, han llevado a la búsqueda de alternativas para disminuir el uso de agua, tales como la utilización de compost y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). En esta investigación se caracterizó la dinámica poblacional de *Pseudomonas* sp (Ps) cepa AG-97 y *Bacillus* sp (Bc) cepa AG-98 mediante la inoculación en compost que se mantuvo a 25°C en oscuridad por 90 días. Además, se estableció un ensayo en maceta, las cepas Bc y Ps se inocularon en compost, el cual se utilizó como sustrato para el crecimiento de cilantro a diferentes reposiciones de agua (100, 70 y 40 % CC) evaluándose largo foliar y radicular, peso seco aéreo y radicular; y volumen radicular. Los resultados mostraron que las poblaciones de Ps como de Bc inoculadas individualmente en compost disminuyeron en el transcurso de 90 días. Sin embargo, Bc inoculado en mezcla aumentó su población. El peso seco aéreo y el volumen de raíces disminuye con una menor reposición hídrica. Las plantas de cilantro inoculadas con Ps y/o BcPs permiten un mayor peso seco de raíces por planta y una mayor proporción de peso seco de raíces por planta a distintas reposiciones de agua, además de un mayor potencial hídrico, desarrollo de vegetación aérea y volumen de raíces.

SUMMARY

The demand for a more sustainable agriculture, coupled with the climate crisis causing prolonged droughts, has led to the search for alternatives to reduce water use, such as the use of compost and plant growth promoting bacteria (PGPR). In this research, the population dynamics of *Pseudomonas* sp (Ps) strain AG-97 and *Bacillus* sp (Bc) strain AG-98 were characterized by inoculating them in compost that was kept at 25°C in the dark for 90 days. In addition, a pot experiment was set up where Bc and Ps strains were inoculated in compost, which was used as a substrate for coriander growth at different levels of water replenishment (100, 70 and 40% CC). Leaf and root length, aerial and root dry weight, and root volume were evaluated. The results showed that the populations of both Ps and Bc inoculated individually in compost gradually decreased over the course of 90 days. However, Bc inoculated in the mixture gradually increased its population. Aerial dry weight and root volume were observed to decrease with lower water supply. Coriander plants inoculated with Ps and/or BcPs allowed for greater root dry weight per plant and a higher proportion of root dry weight per plant at different water supplementation levels, as well as increased water potential, aboveground vegetation development, and root volume.

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos y el modo en que se gestionan son fundamentales para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria. El desafío de satisfacer unas necesidades de agua mayores es motivo de preocupación creciente junto con las amenazas planteadas por el cambio climático, tales como la incertidumbre en lo que respecta a las precipitaciones y la menor disponibilidad de agua, que afecta a la agricultura de secano y de regadío (FAO, 2020). Por esta razón, la introducción de técnicas tendientes a proporcionar tolerancia al déficit hídrico de manera sostenible con el medio ambiente resulta crucial para estabilizar y aumentar la producción de alimentos (Budak *et al.*, 2013; Orana y Leos, 2020). Una de estas estrategias es el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR por sus siglas en inglés Plant Growth Promoting Rhizobacteria), bacterias aisladas principalmente del área de la rizósfera que promueven el crecimiento de las plantas mediante una

amplia variedad de mecanismos (Pii *et al.*, 2015). Diversos estudios han comprobado que la inoculación de plantas con PGPR pueden estimular el crecimiento de las plantas a través del aumento en la disponibilidad de nutrientes y regulación hormonal, manteniendo la salud de las plantas al aumentar el acceso al agua y los nutrientes y modular la resistencia a plagas y enfermedades (Reyes-Castillo *et al.*, 2019; Mutumba *et al.*, 2018; Bashan *et al.*, 2014). En particular, bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* han mostrado ser un aporte al crecimiento de cultivos en ecosistemas que presentan problemas de déficit hídrico, ya que aumentan la tolerancia al estrés hídrico y facilitan el desarrollo del vegetal y el crecimiento normal de la raíz. Uno de los mecanismos que estimulan estos procesos es la capacidad de producir enzimas que hidrolizan el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), precursor del etileno, el cual cuando es sintetizado en exceso ante condiciones de estrés, provoca distintas consecuencias en el desarrollo normal de las plantas, debido a su efecto inhibitorio en la expansión y elongación radicular (Mutumba *et al.*, 2018; Medina, 2017). Además, algunas PGPR tienen la habilidad de sintetizar el ácido indol-3-acético (AIA), auxina responsable de estimular la división celular y el crecimiento de raíces laterales (Widnyana y Javandira, 2016). Por otro lado, el género *Bacillus* es además reconocido por formar endospora que les otorga mayor tolerancia a factores abióticos, incrementando su sobrevivencia en el sustrato (Medina, 2017).

Pese a los beneficios de las PGPR, poco después de que las suspensiones de bacterias son inoculadas en el suelo sin un portador adecuado, la población de bacterias disminuye rápidamente para la mayoría de las especies. Este fenómeno, combinado con la heterogeneidad inherente del suelo es el obstáculo clave que dificulta el mantenimiento de la actividad de las PGPR en la rizosfera (Bashan *et al.*, 2014). Por esta razón, el portador de los inoculantes para uso a escala de campo debe diseñarse para proporcionar una fuente confiable de bacterias que sobrevivan en el suelo y estén disponibles para los cultivos cuando sea necesario (Bashan y Luz, 2015). Los portadores en la formulación incluyen turba, arcillas, materia orgánica y carbón vegetal (Bashan *et al.*, 2014).

Un material atractivo para la formulación de inoculantes bacterianos, tanto por

su facilidad de manejo como disponibilidad es el compost, el cual es rico en nutrientes tanto en sus formas minerales como orgánicas (INN, 2015). El compost contiene humus y ácidos grasos volátiles que ayudan a incrementar el contenido de agua en el suelo tanto en capacidad de campo como en punto de marchitez permanente, permitiendo una mayor biomasa y actividad microbiana (Baiano *et al.*, 2021; Nadeem *et al.*, 2017; Cortés *et al.*, 2015). Esto debido a que uno de los factores ambientales más importantes en el crecimiento de las PGPR es la disponibilidad de agua en el suelo, ya que mejora la movilidad de las bacterias en el suelo (Jiménez *et al.*, 2018). El compost mejora la disponibilidad de oxígeno, mejora la porosidad del suelo, mantiene la temperatura del suelo e influye en la actividad microbiana al poseer antagonistas biológicos de fitopatógenos. (Bauddh *et al.*, 2020; Onwosi *et al.*, 2017; Muñoz, 2019; Harrison, 2008; Rabbi *et al.*, 2016). Estudios realizados en inoculaciones de compost con bacterias PGPR evidenciaron una mayor cantidad de nitrógeno en el suelo después de una temporada productiva en olivo (Medina y Núñez, 2015). En un estudio realizado por Abo-Kora y Mohsen (2016) demostraron un mayor desarrollo foliar de albahaca al inocular con PGPR el suelo arcilloso con niveles crecientes de compost. A su vez, el compost elaborado con desechos agroindustriales fue superior a la turba para mantener la supervivencia de varios rizobios y PGPR (Bashan *et al.*, 2014).

Por otro lado, uno de los cultivos hortícolas con buen poder de crecimiento bajo diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas es el cilantro (*Coriandrum sativum* L.), el cual es capaz de aumentar sus parámetros de crecimiento cuando es inoculado con PGPR (Mishra *et al.*, 2017). Sin embargo, disminuye su productividad con láminas de riego decrecientes (Mejia *et al.*, 2014; Linares *et al.*, 2020). Por ello, constituye una buena planta modelo para la evaluación de los efectos de bacterias inductoras de tolerancia a estrés ante situaciones de déficit hídrico. Los objetivos de esta investigación fueron evaluar el compost como sustrato para la inoculación de PGPR y su efecto sobre el crecimiento de cilantro bajo condiciones de estrés hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes generales

Se utilizaron cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) provenientes del cepario del Laboratorio de Bacteriología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Concepción, Campus Chillán. Las cepas utilizadas fueron AG-97 del género *Pseudomonas* (Ps) y la cepa AG-98 del género *Bacillus* (Bc). AG-97 fue seleccionada por sus habilidades para inducir el desarrollo radicular a través de la producción de ácido indol acético (AIA) y fijar nitrógeno (Sepúlveda *et al.*, 2013) y AG-98 por producir ACC desaminasa y fijar nitrógeno (Medina, 2017).

Se utilizó compost clase A proveniente del campo experimental Santa Rosa, perteneciente al Centro Regional Quilamapu, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán (36°31 lat. Sur, 71°54 long. Oeste). Para evaluar su aporte al crecimiento y la supervivencia de Ps y Bc.

Desde criopreservación (-80°C) se reactivaron las dos cepas bacterianas cultivándolas en placas Petri con agar nutritivo (Difco: France) mediante siembra en estrías por 24 h a 25 °C. Una vez desarrolladas las colonias, se inoculó un matraz con caldo nutritivo estándar (Difco: France) para la multiplicación de las bacterias en agitación constante a 25 °C por 72 h

Inoculación y almacenaje de bacterias en compost

Esta investigación se realizó en el Laboratorio de Bacteriología del Departamento de Producción Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Chillán, Chile. Las bacterias fueron multiplicadas en caldo nutritivo estándar a 25 °C y en agitación constante hasta alcanzar la etapa final de la fase logarítmica de acuerdo con el tiempo de incubación determinado en la curva de crecimiento. El compost fue separado en porciones de 58 g y depositado en 12 frascos estériles de 100 mL de volumen. Se evaluaron 4 tratamientos, siendo: Tratamiento 1: Compost + cepa *Bacillus* sp. AG-98 (Bc), 2: Compost + *Pseudomonas* sp. AG-97 (Ps), 3: Compost + *Bacillus* sp. AG-98 + *Pseudomonas* sp. AG-97 (BcPs) y 4: Compost no inoculado (Ct). El diseño de este experimento fue completamente al azar con tres repeticiones por cada tratamiento. Para las muestras con una bacteria se inoculó el frasco con 3 % de caldo nutritivo con

bacteria a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹ y para las muestras combinadas se inoculó 1,5% de caldo nutritivo de cada una de las bacterias a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹. Los frascos fueron mantenidos a 25 °C y en oscuridad. Se evaluó la población bacteriana por tratamiento semanalmente el primer mes y luego cada dos semanas. El tiempo de duración del ensayo fue de 3 meses. Para cada evaluación se tomó una muestra de 1 g de compost desde cada frasco, la que fue suspendida en 9 mL de solución salina estéril y dejado en agitación constante por 15 minutos a 230 RPM. A partir de esta muestra se realizaron diluciones en series de 10, hasta 10^{-5} y se realizó recuento en microgota a partir de cada una de ellas.

Efecto de compost inoculado a diferentes láminas de reposición de agua en cilantro

Este ensayo se realizó en un fitotrón ubicado en el edificio Humberto Serri Gallegos en la Estación Experimental “El Nogal”, con luz LED para crecimiento vegetativo, temperatura promedio de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y un fotoperiodo de 14 horas de luz y 10 horas de oscuridad. Se estableció un ensayo en macetas con un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial. Los factores fueron: Tratamiento de inoculación del compost y Nivel de reposición hídrica. Los tratamientos de inoculación fueron los siguientes: compost no inoculado (Test), Compost + *Bacillus* AG-98 (Bc), Compost + *Pseudomonas* AG-97 (Ps) y Compost + *Bacillus* AG-98 + *Pseudomonas* AG-97 (BcPs). Los niveles de reposición de agua fueron: Capacidad de campo (100%), 70 % de reposición hídrica y 40% de reposición hídrica. Se incluyó cuatro repeticiones por tratamiento.

En macetas de 500 cm³ se depositaron 375 cm³ de una mezcla de sustrato compuesto por arena: perlita, dispuestos a razón de 50:50. Para disminuir la carga microbiana del sustrato, éste fue previamente pasteurizado en autoclave a 100 °C por 15 minutos, luego se mezcló con 125 cm³ de compost (clase A). Las macetas de los tratamientos Bc y Ps se inocularon con 3 % de caldo nutritivo con las bacterias correspondientes a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹ en base al contenido de compost, mientras que el tratamiento BcPs se inoculó con 1,5% de caldo nutritivo con cada una de las bacterias a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹ en base al contenido de compost. Las semillas de cilantro fueron desinfectadas

superficialmente con etanol al 70 % (v/v) por 30 segundos y luego lavadas con agua destilada estéril (50 mL) por un minuto. Se sembraron cuatro semillas en cada maceta y durante la fase de germinación fueron regadas al 100% de reposición hídrica del sustrato. Una vez emergidas las plántulas se aplicaron los tratamientos de reposición de agua en las macetas. Para mantener los porcentajes de agua requeridos, en primer lugar, se midió el contenido de humedad del sustrato de la maceta a capacidad de campo. Para ello, primero se pesó la maceta con sustrato, luego se saturó con agua y se mantuvo así durante 48 h para que el agua gravimétrica escurriera. Las macetas se volvieron a pesar y la diferencia de peso entre el peso inicial (antes de la saturación) y el peso final (48 h después de la saturación) se consideró como contenido de humedad a capacidad de campo. Para mantener los niveles de agua requeridos (100, 70 y 40 % de reposición hídrica) durante el experimento, las macetas (maceta + sustrato) se pesaron 3 veces por semana y se agregó agua en cada maceta según la cantidad requerida para mantener cada nivel particular.

Evaluaciones. Transcurridos 40 días desde la siembra, se evaluaron los siguientes parámetros.

Potencial hídrico del tallo (Mpa): Se midió utilizando una cámara de presión de tipo Scholander (PMS-60, PMS Instruments, Portland, EEUU). Las mediciones se realizaron en dos plantas por cada tratamiento y una hoja por cada planta.

Peso seco aéreo. Se extrajo cada planta y se lavó con agua durante tres minutos para eliminar partículas de sustrato, luego se secó cada unidad experimental durante una hora a temperatura ambiente para eliminar el agua adherida y se cortó a nivel de cuello de la planta, separando raíz y parte aérea (hojas y tallo). A continuación, la parte aérea de cada muestra se depositó dentro de una bolsa de papel y se secó a 60 °C por 84 h, posteriormente fueron pesadas en balanzas analíticas SHIMADZU, modelo AUX220®.

Volumen radicular. Se usó una probeta milimétrica de 250 mL, luego cada muestra radicular fue sumergida en el agua para así observar el desplazamiento del agua el cual corresponde al volumen radicular, para esto se consideró como punto inicial de la medición la zona bajo el cuello de la planta y un volumen inicial de 200 mL.

Peso seco radicular. La parte radicular de cada muestra se depositó dentro de una bolsa de papel y se secó a 60 °C por 84 h, posteriormente fueron pesadas en balanzas analíticas SHIMADZU, modelo AUX220®.

Análisis de datos

Los datos de población bacteriana en compost fueron transformados logarítmicamente y graficados en función del tiempo realizando luego una regresión lineal.

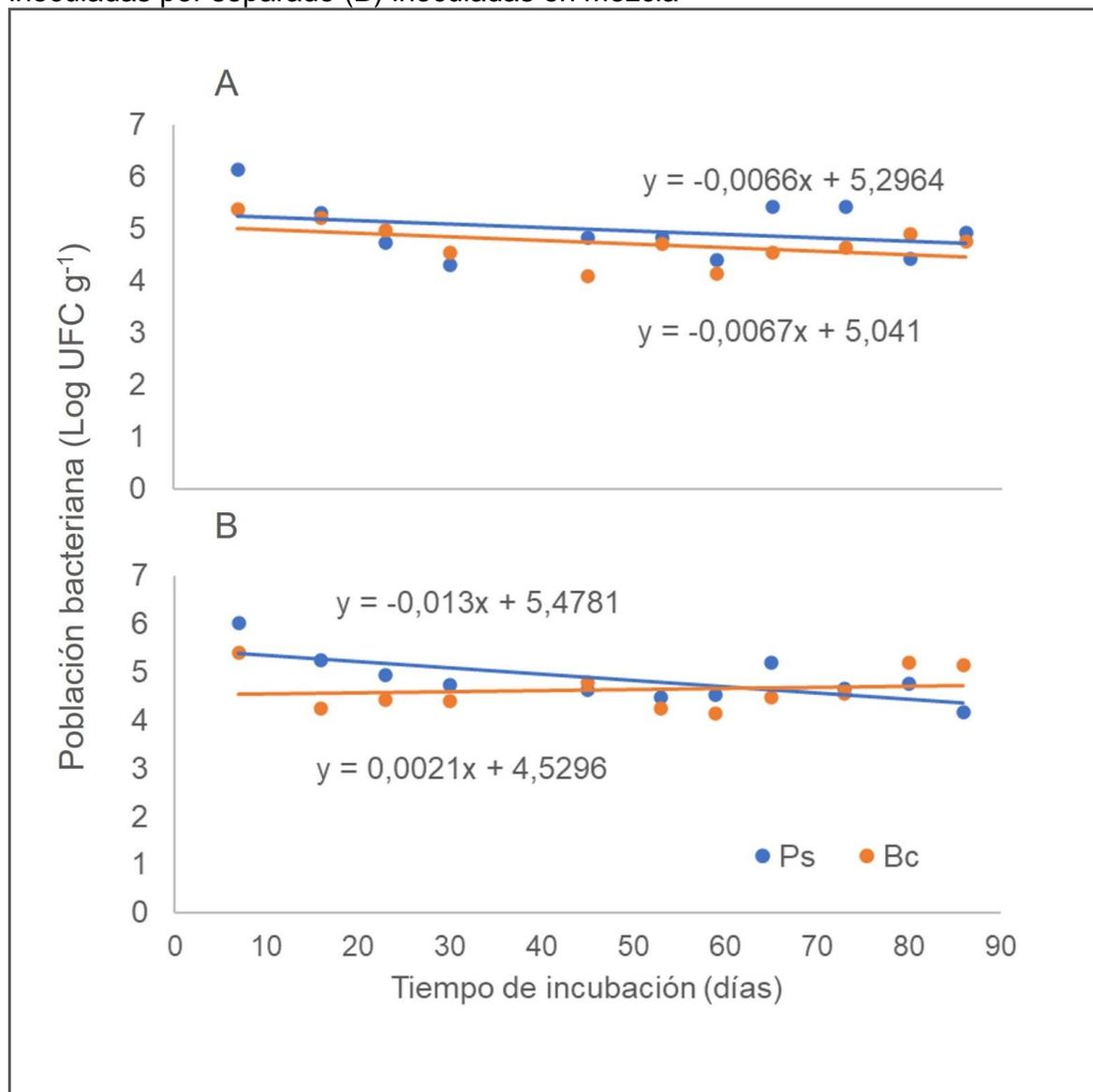
Los datos de volumen de raíces, peso seco aéreo y peso seco radicular fueron sometidos a análisis de varianza previa verificación de los supuestos, de haber diferencias significativas se aplicó el test de separación de medias de Tukey ($P \leq 0,05$). Los datos de potencial hídrico del tallo fueron correlacionados con el peso seco aéreo radical y aéreo, mediante una regresión lineal. Los softwares estadísticos utilizados en los análisis fueron Infostat y SAS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inoculación y almacenaje de bacterias en compost

La Figura 1 presenta la población bacteriana en unidades formadoras de colonia (UFC) de las cepas *Pseudomonas* AG-97 y *Bacillus* AG-98 incubadas por separado en compost a 25 °C durante 3 meses (A). Para ambas bacterias, se observó una tendencia a la disminución en la población a tasas similares a medida que aumentó el tiempo de almacenaje. De acuerdo con Jiménez *et al.* (2018) y Glick. (2014) los exudados de las raíces (incluidos aminoácidos, polisacáridos y ácidos orgánicos) estimulan la habilidad competitiva de las bacterias rizosféricas, ya que aportan nutrientes e influyen en el establecimiento, proliferación y actividad bacteriana en un ambiente. En este caso en particular la ausencia de estos exudados puede haber incidido sobre la disminución de las poblaciones de las bacterias. Los datos registrados de la población bacteriana al ser inoculadas en mezcla y contabilizadas por separado (B), muestran una tendencia a la disminución en la población de la cepa *Pseudomonas* AG-97 y una tendencia a incrementar las UFC en la cepa *Bacillus* AG-98 en la medida que aumenta el tiempo de almacenaje.

Figura 1. Población bacteriana de las cepas *Pseudomonas* AG-97 y *Bacillus* AG-98 sobre sustrato de compost mantenidas en incubación a 25°C durante 3 meses (A) inoculadas por separado (B) inoculadas en mezcla



Estudios realizados por Rojas *et al.* (2016), obtuvieron resultados similares al inocular diferentes cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus* en conjunto, donde una de las cepas de *Bacillus* presentó una leve tendencia a producir más unidades formadoras de colonias que *Pseudomonas*. Esto podría deberse a una relación de comensalismo entre ambas especies (Ahkami *et al.*, 2017), donde una de las bacterias puede obtener energía a costa de algún compuesto secretado por la otra especie bacteriana, como por ejemplo nitrógeno o ácidos orgánicos (Sánchez y

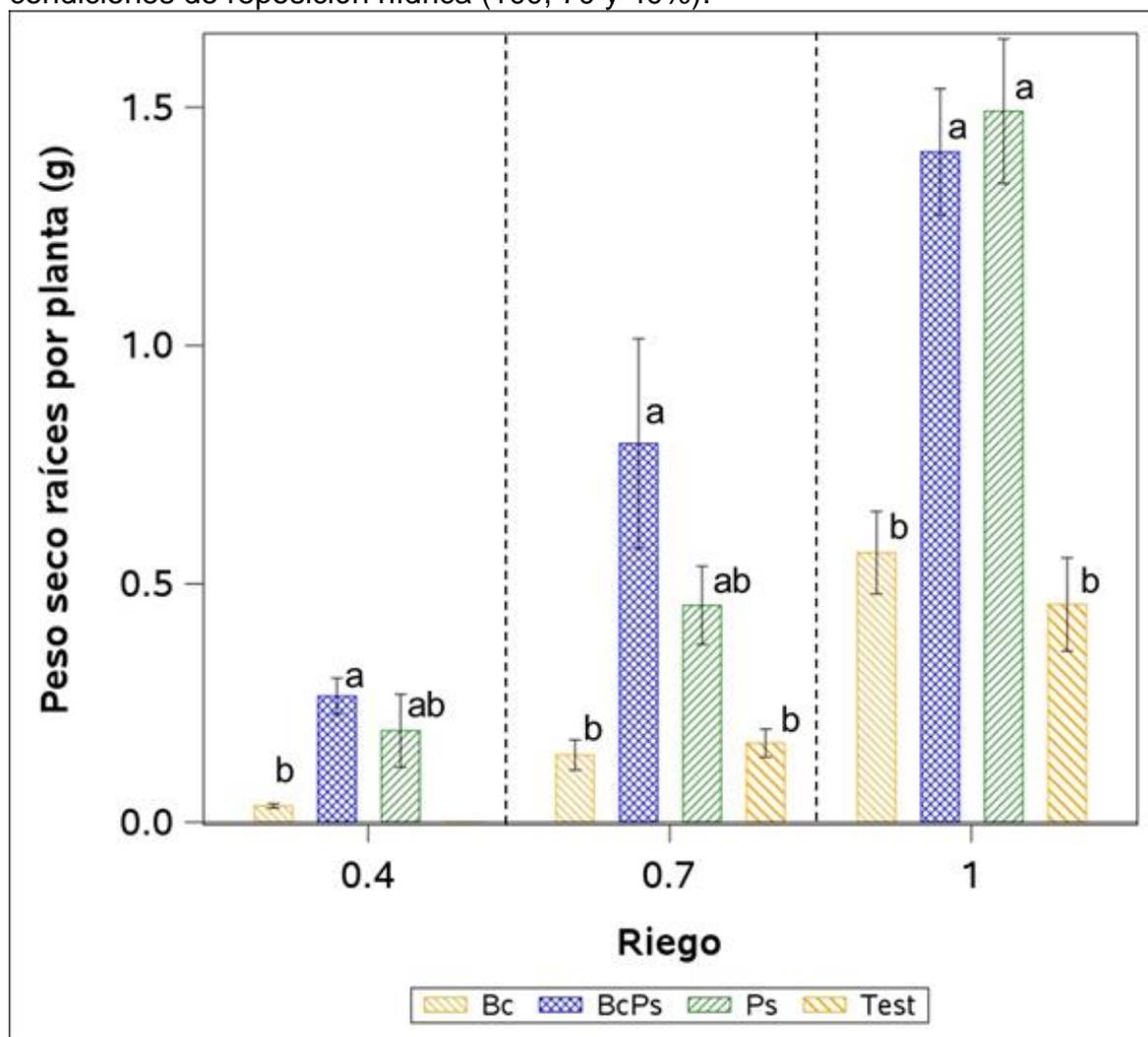
Guerra, 2022; Bonilla *et al.*, 2021).

Ensayo de déficit hídrico en cilantro

Las plantas de cilantro en compost con diferentes tratamientos de inoculación y de reposición hídrica mostraron diferencias significativas en el peso seco de raíces ($P \leq 0,05$) (Figura 2), si hubo interacción entre los factores inoculación y nivel hídrico, por lo que la comparación se realizó entre tratamientos de inoculación para cada nivel hídrico. Se observó que el compost inoculado con Ps y con la mezcla BcPs lograron un mayor peso seco de raíces de cilantro en la condición de 100 % de reposición hídrica, pero con 70 % y 40 % de reposición hídrica sólo el compost inoculado con la mezcla BcPs tuvo un efecto significativo en comparación con el compost sin inoculación ($P \leq 0,05$). Diversos estudios describen que las auxinas de origen bacteriano, como el AIA, generan efectos positivos en el desarrollo del sistema radicular al tener la capacidad de promover la división celular y aumentar la expansión y elongación de la raíz (Angulo *et al.*, 2014; Jaramillo *et al.*, 2016; Jiménez *et al.*, 2019) lo que facilita la absorción de agua y nutrientes, mitigando la pérdida de biomasa debido al retraso en el crecimiento por causa del estrés abiótico (Bonilla *et al.*, 2021; Vega *et al.*, 2016). Además, la bacteria Bc se caracteriza por producir la enzima ACC-desaminasa (Astroza, 2018), produciendo una disminución de los niveles de etileno ante condiciones de estrés, permitiendo con esto que la planta tolere los factores adversos por breves periodos de tiempo, y a su vez la bacteria utiliza el ACC para su propio crecimiento (Glick, 2014). Además, es reconocido el efecto benéfico que muchas veces genera la inoculación con mezclas o consorcios bacterianos, ya que las interacciones como la sinergia y simbiosis que existen entre los microorganismos pueden ser beneficiosas al mejorar su desarrollo y crecimiento o permitir la supervivencia de las bacterias que interactúan con las plantas. Además de combinar los efectos benéficos de las PGPR sobre las plantas. (Pérez, 2019; Cerna *et al.*, 2018; Cano, 2011).

Para la variable proporción peso seco de raíces por planta (Figura 3) hubo interacción entre los factores de inoculación y nivel hídrico, por lo que la comparación se realizó entre tratamientos

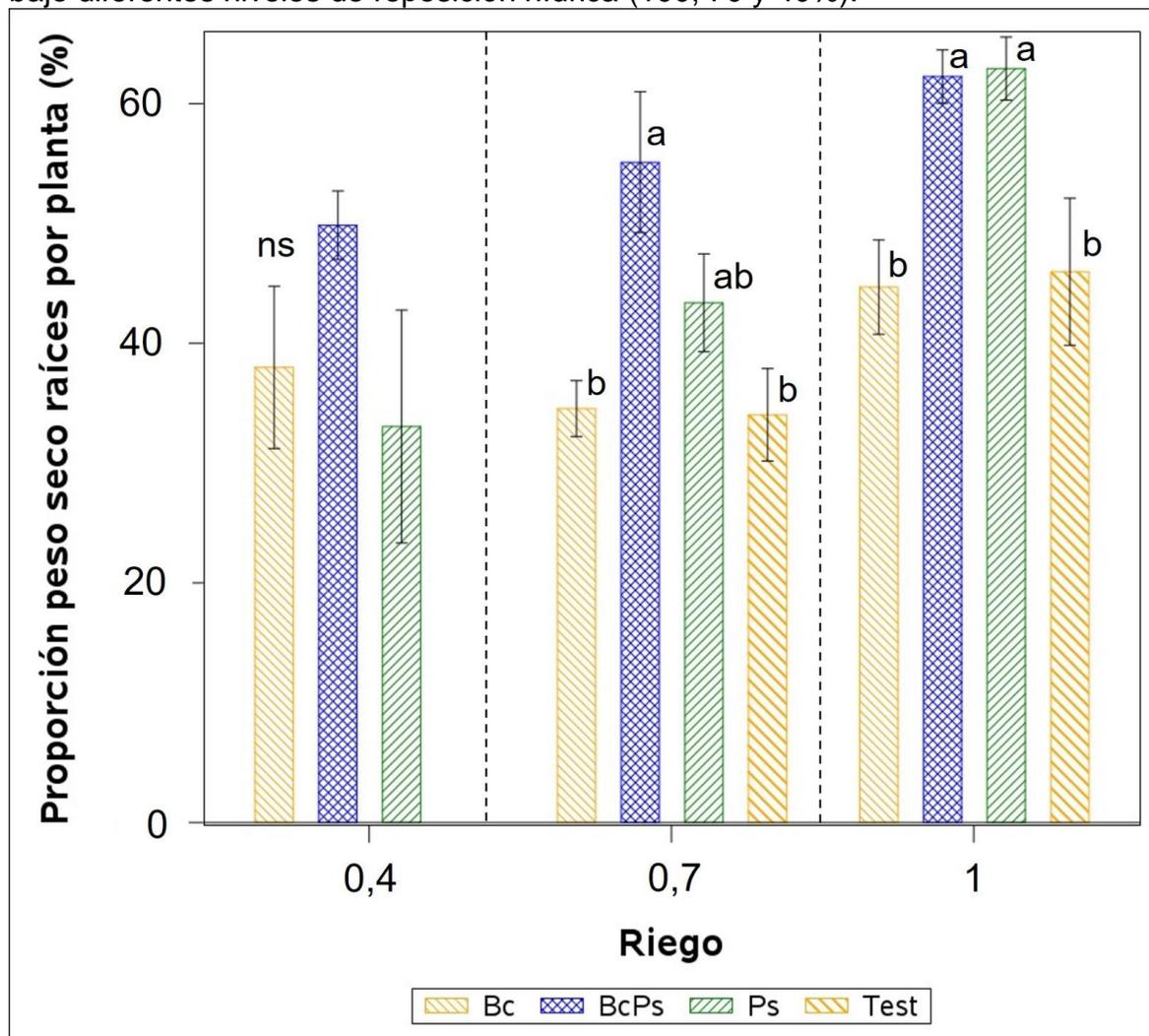
Figura 2. Efecto de *Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla, sobre el peso seco de raíces de cilantro en diferentes condiciones de reposición hídrica (100, 70 y 40%).



* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Test corresponde al testigo con compost sin inoculación bacteriana.

de inoculación para cada nivel hídrico. Se observó que el compost inoculado con Ps y con la mezcla BcPs lograron una mayor proporción de raíces de cilantro en condición de 100% de reposición hídrica, pero con 70% de reposición hídrica sólo el compost inoculado con la mezcla BcPs tuvo un efecto significativo en comparación con el compost sin inoculación ($P \leq 0,05$). Para la condición de 40% de reposición hídrica no hubo diferencia significativa entre los tratamientos Bc, BcPs y Ps. Sumado a lo anterior, al no obtener los datos del compost sin inoculación no

Figura 3. Efecto de *Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla sobre la proporción de peso seco de raíces de cilantro bajo diferentes niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%).



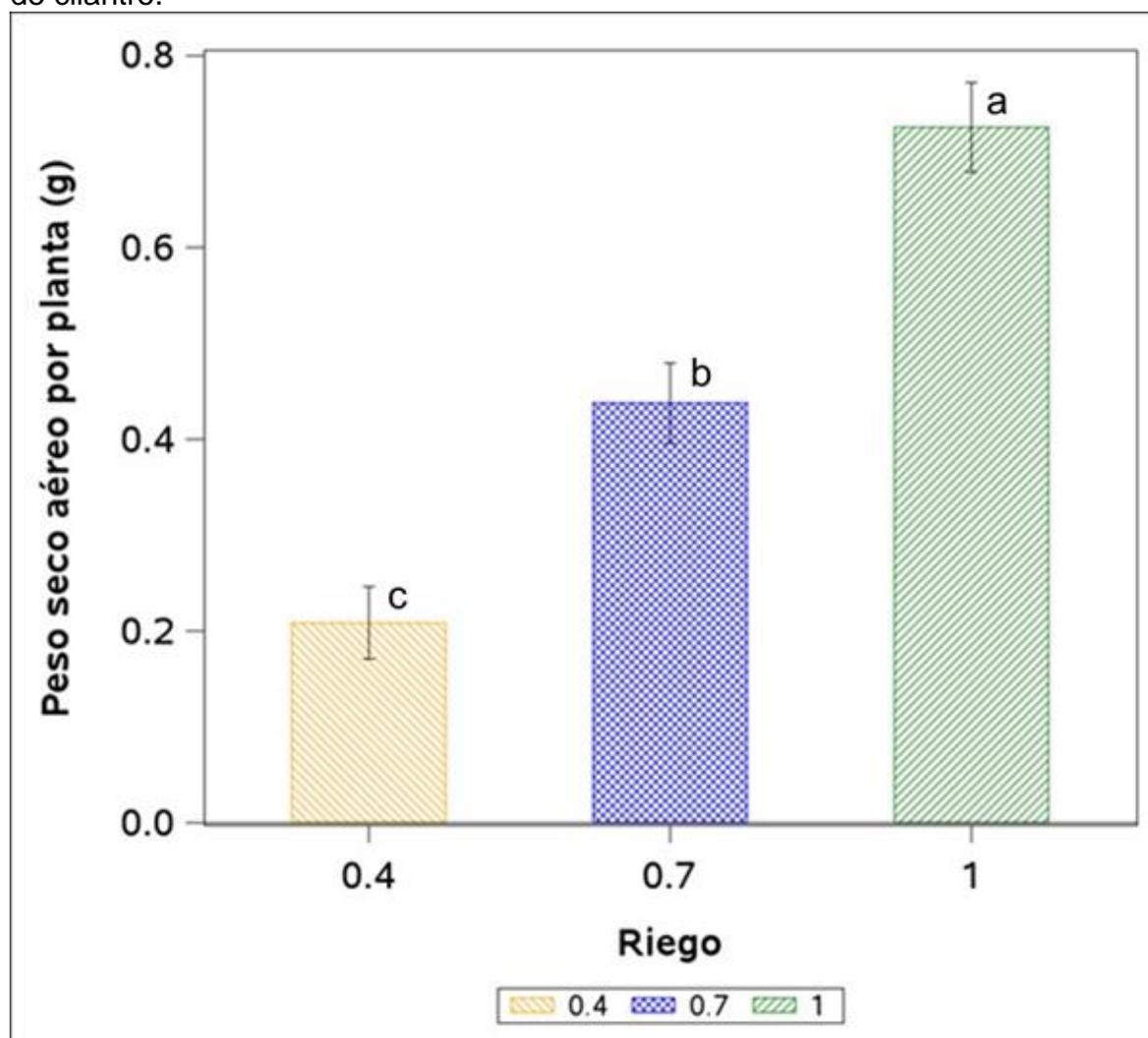
* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Test corresponde al testigo con compost sin inoculación bacteriana.

se pudo realizar análisis estadístico de dicho tratamiento. Es reconocido que la raíz de las plantas continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés hídrico (Moreno, 2009). Estos resultados sugieren que la presencia de Bc resultó fundamental en promover una mayor locación de recursos en las raíces inoculadas con Ps, lo cual indicaría un efecto sinérgico de Bc y Ps sobre la capacidad de promover una distribución de carbohidratos a las raíces. En cuanto a los efectos del compost inoculado con Ps y/o Bc sobre el peso seco aéreo de cilantro

bajo diferentes niveles de reposición hídrica, al no haber interacción entre los factores inoculación y reposición de agua, estos se presentan separados por factor.

En la figura 4 se muestra que el máximo peso seco aéreo se observó a 100 % de reposición hídrica, seguido por las plantas con 70 % de reposición hídrica y el menor peso seco aéreo se obtuvo a 40 % de reposición hídrica. Estudios realizados por Linares *et al.* (2020), obtuvieron resultados similares al aplicar riegos decrecientes en plantas de cilantro, las cuales obtuvieron menor peso seco aéreo a menores tasas de riego.

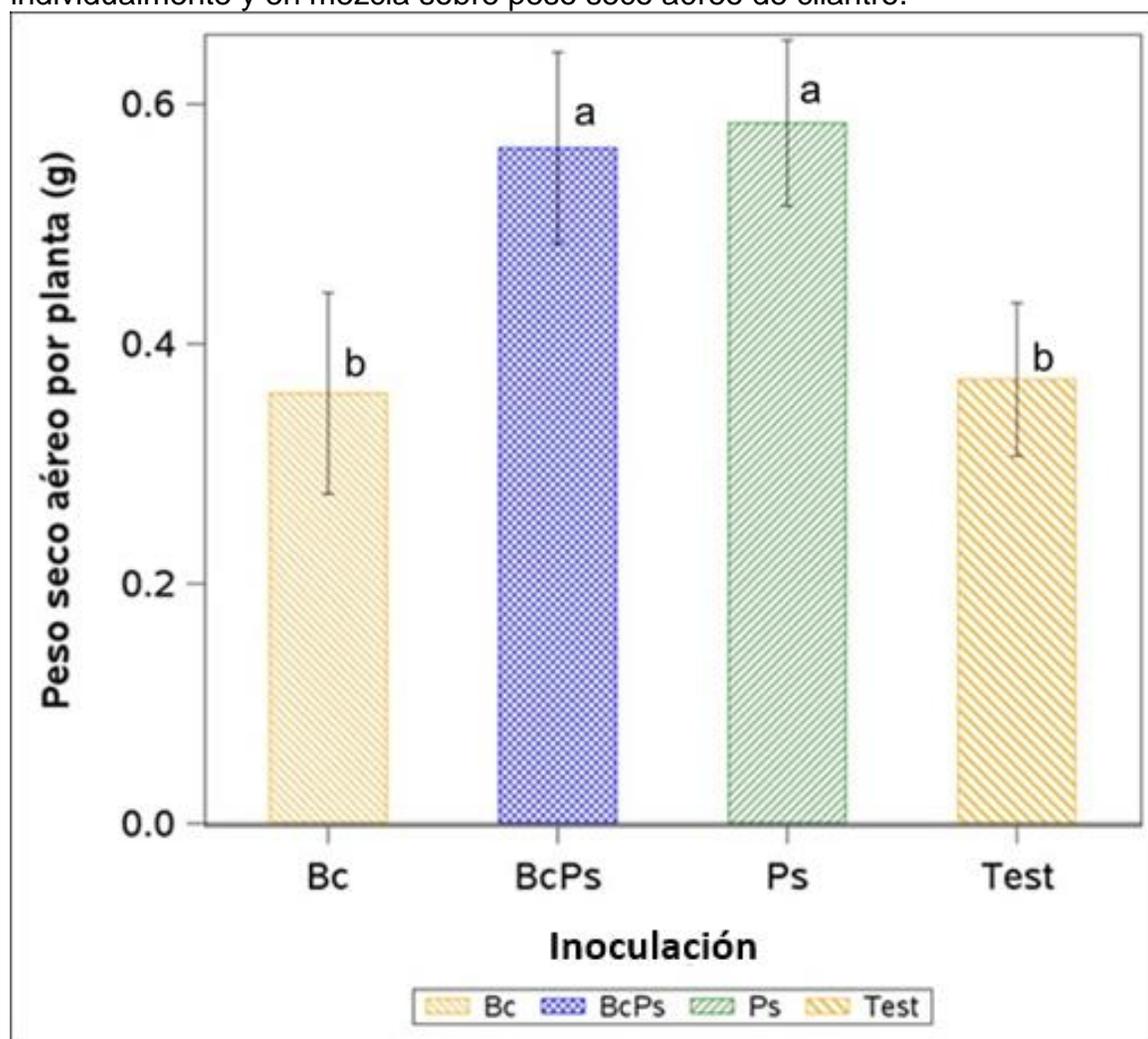
Figura 4. Efecto del nivel de reposición de lámina de agua sobre el peso seco aéreo de cilantro.



* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

La Figura 5 muestra la respuesta de las plantas con Ps y/o Bc en el peso seco aéreo de la planta. El máximo peso seco aéreo se observó con el compost inoculado con Ps y con BcPs, siendo significativamente diferentes ($P \leq 0,05$) al tratamiento testigo y al compost inoculado sólo con Bc. Es ampliamente reconocido que algunas especies de PGPR promueven el crecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés abiótico (Mutumba *et al.*, 2018; Granados. 2022). En el trabajo realizado por Pérez. (2019), se obtuvo resultados similares al inocular PGPR (*Pseudomonas* sp y *Rhizobium leguminosarum*.) en plantas de maní, las cuales lograron mayor peso seco en comparación con las plantas no inoculadas sometidas a déficit hídrico.

Figura 5. Efecto de *Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla sobre peso seco aéreo de cilantro.

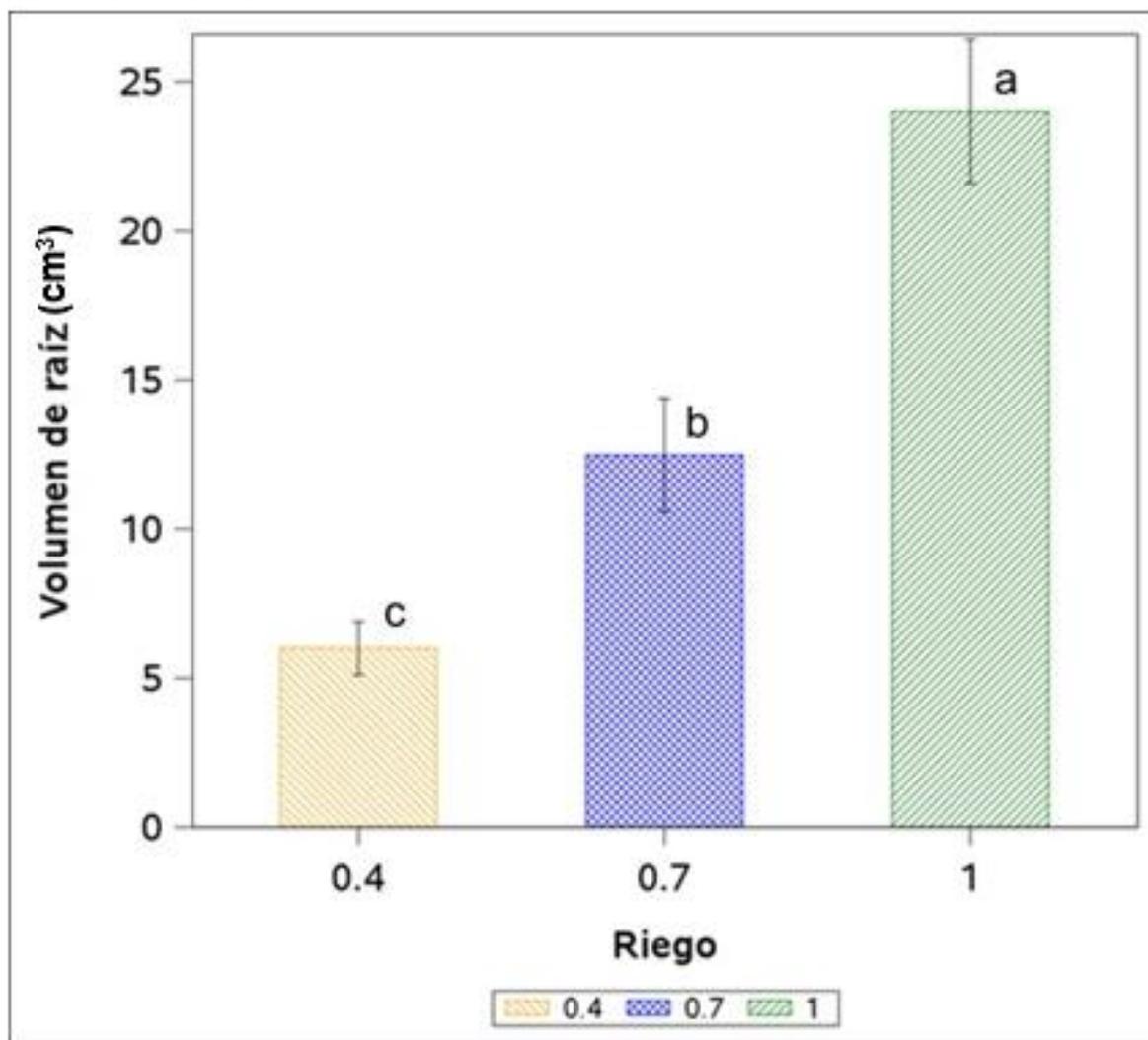


* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Test corresponde al testigo con compost sin inoculación bacteriana.

La cepa de *Pseudomonas* utilizada en este trabajo se caracteriza por producir AIA y fijar nitrógeno, estimulando el crecimiento aéreo y radical (Sepúlveda *et al.*, 2013; Ponce, 2015). Las auxinas, como el AIA, generan efectos positivos en el desarrollo vegetativo de la planta, presentando en general un mayor promedio de la altura del tallo y longitud de hojas (Lara *et al.*, 2011).

Los tratamientos de riego influyeron significativamente en el volumen radical del cilantro ($P \leq 0,05$), alcanzándose el mayor volumen con el 100% de reposición hídrica, seguido de 70% y finalmente el volumen de raíces más bajo fue el de plantas expuestas a 40% de reposición de agua (Figura 6).

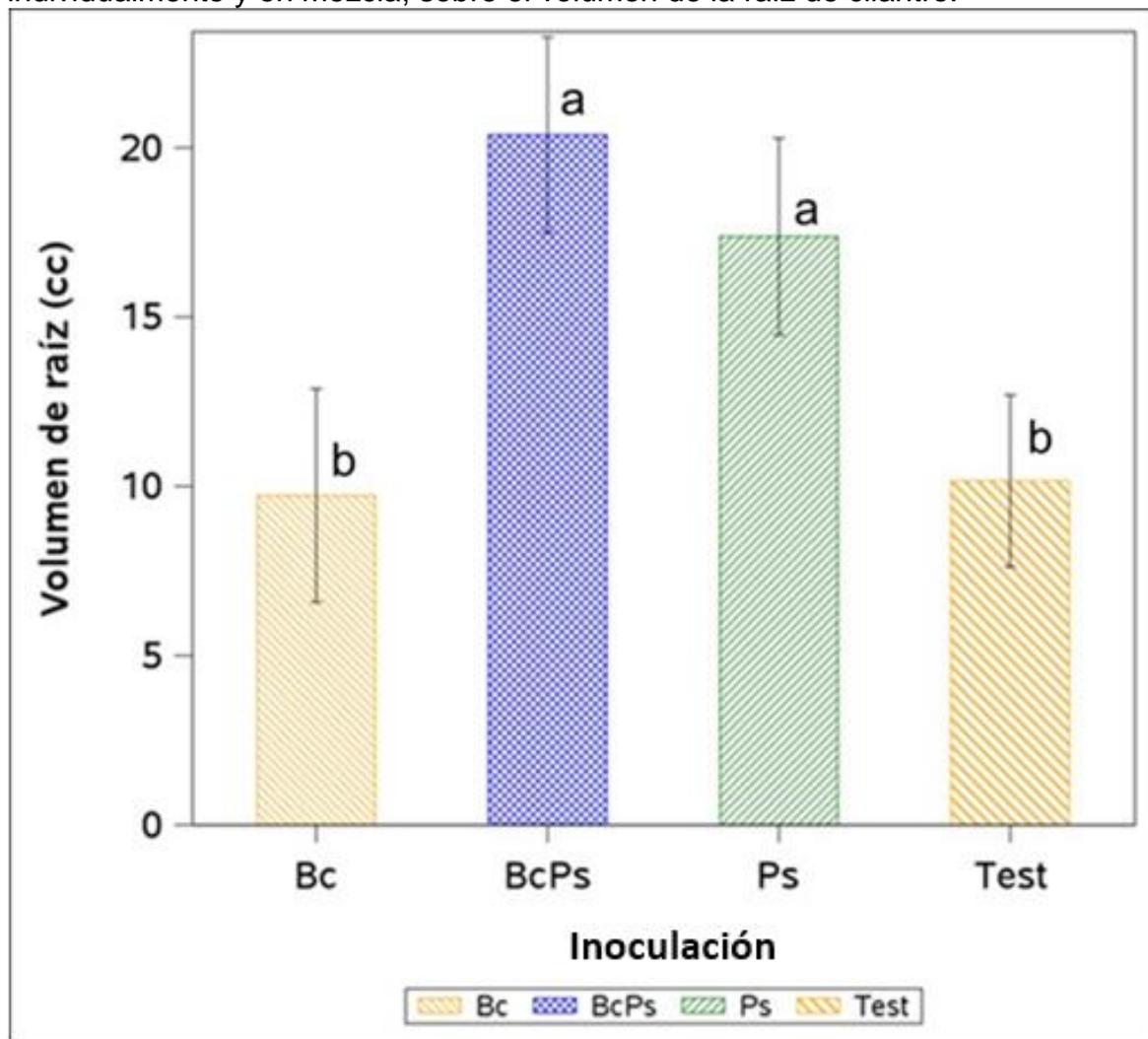
Figura 6. Efecto del nivel de reposición de lámina de agua sobre el volumen de raíces de cilantro.



* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

En cuanto a los tratamientos de inoculación (Figura 7), los mayores volúmenes radicales se alcanzaron en compost inoculado con Ps y con la mezcla BcPs, tratamientos que fueron superiores al testigo y al Bc ($P \leq 0,05$).

Figura 7. Efecto de *Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc) inoculadas individualmente y en mezcla, sobre el volumen de la raíz de cilantro.



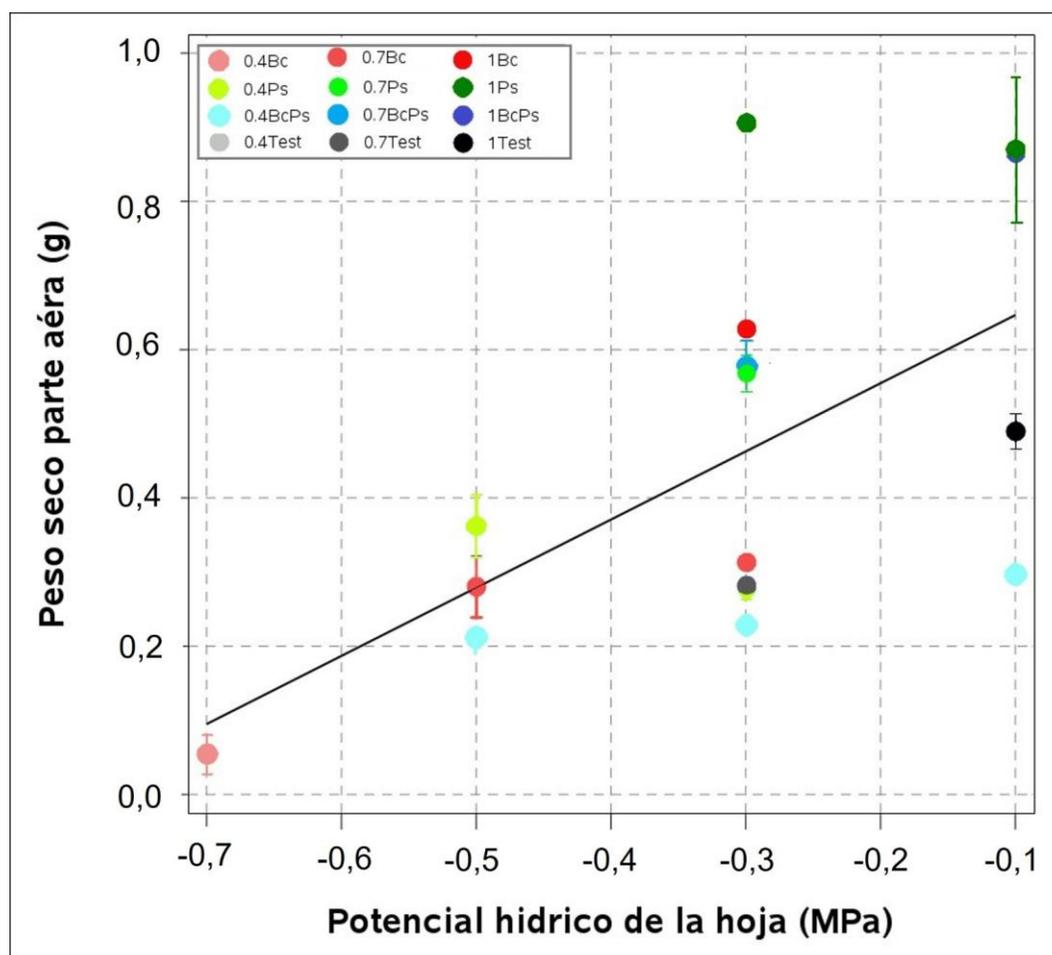
* Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Test corresponde al testigo con compost sin inoculación bacteriana.

Los resultados concuerdan con estudios que reportan que la inoculación con *Bacillus* sp produjo un aumento de 20% en el volumen de raíces en plantas de quinua (León *et al.*, 2019). En este trabajo el volumen de raíces en compost inoculado con Ps y con BcPs se duplicó en comparación al tratamiento testigo. El aumento del volumen radical puede deberse a la actividad ACC - desaminasa y a la

biosíntesis de AIA de las PGPR. Por un lado, la enzima ACC - desaminasa libera nitrógeno que es disponible para la planta y permite un mayor aprovechamiento del AIA de origen vegetal en condiciones de estrés; y el AIA bacteriano estimula el crecimiento de raíces secundarias (Jaramillo *et al.*, 2016; Jiménez *et al.*, 2019; Cedeño, 2018; Glick, 2014).

Las figuras 8 y 9 muestran la relación lineal con pendiente positiva entre el potencial hídrico de la hoja y los pesos secos aéreo y de raíces, respectivamente, con diferentes tratamientos de inoculación y de reposición hídrica.

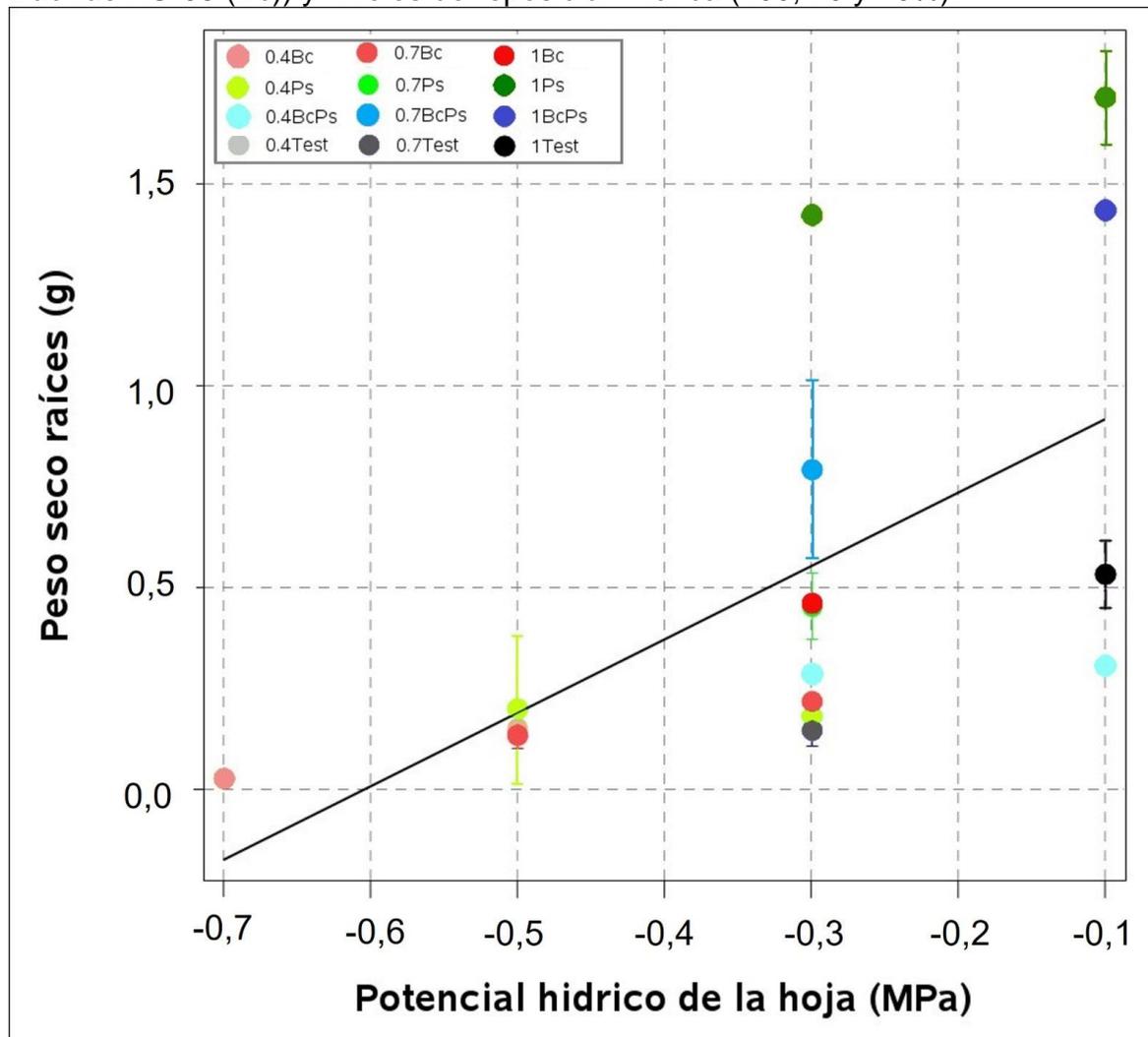
Figura 8. Relación entre potencial hídrico de la hoja y peso seco aéreo del cilantro con diferentes tratamientos de inoculación de compost (*Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc)) y niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%).



En general las plantas que fueron regadas con mayores tasas de reposición hídrica exhibieron mayores potenciales hídricos de la hoja y pesos secos aéreo y

radical. En un estudio realizado por May *et al.* (2011) observaron que a mayores niveles de humedad aprovechable en el sustrato más positivo es el potencial hídrico, mayor es la biomasa seca total y menor es el estrés hídrico en plantas de ají (*Capsicum chinense*).

Figura 9. Relación entre potencial hídrico de la hoja y peso seco de raíces con diferentes tratamientos de inoculación de compost (*Pseudomonas* AG-97 (Ps) y *Bacillus* AG-98 (Bc)) y niveles de reposición hídrica (100, 70 y 40%).



El hecho que ningún testigo con 40% de reposición hídrica haya sobrevivido sugiere que la inoculación bacteriana además de promover la producción de materia seca estimuló su tolerancia a la falta de agua. En particular, los tratamientos Ps y BcPs presentaron mayores potenciales hídricos y pesos secos que el tratamiento sólo

inoculado con Bc, indicando que las plantas inoculadas *Pseudomonas* (AG-97) son más tolerantes al déficit hídrico.

Es esperable que plantas con un pobre desarrollo vegetativo y regadas deficitariamente de la misma manera presenten similares severidades de estrés hídrico. Aunque, Ps y BcPs exhibieron un similar peso seco aéreo de raíz, sus potenciales hídricos fueron distintos en el mayor déficit hídrico. El menor nivel de estrés hídrico visto en varias plantas BcPs podría deberse a la acción que las bacterias pueden tener sobre mecanismos que determinan el potencial hídrico de las plantas, tales como cierre estomático o ajuste osmótico.

CONCLUSIONES

De la investigación se puede concluir que:

- Las poblaciones bacterianas tanto de *Pseudomonas* sp. AG-97 como de *Bacillus* sp. AG-98 inoculadas individualmente en compost disminuyeron durante almacenaje. Pero al ser incubadas en mezcla, las poblaciones de *Bacillus* sp AG-98 tendieron a aumentar.
- El peso seco aéreo y el volumen de raíces del cilantro disminuyen significativamente con una reposición hídrica menor.
- Plantas de cilantro en compost inoculado con *Pseudomonas* sp. AG-97 y/o con la mezcla *Pseudomonas* sp. AG-97 + *Bacillus* sp. AG-98 permiten un mayor peso seco de vegetación aérea y de raíces, un mayor volumen radical y una mayor proporción de peso seco de raíces a distintas tasas de reposición hídrica.
- Plantas de cilantro en compost inoculado con *Pseudomonas* sp AG-97 y/o *Pseudomonas* sp AG-97 + *Bacillus* sp AG-98 muestran un mayor potencial hídrico de la hoja en condiciones de déficit hídrico.

REFERENCIAS

1. Abo-Kora, H. and M. Mohsen, 2016. Reducing effect of soil salinity through using some strains of nitrogen fixers bacteria and compost on sweet basil plants. *Int. J. Pharmtech Res.* 9(4): 187-214

2. AhkAmi, A., R. White, P. Handakumbura, and C. Jansson. 2017. Rhizosphere engineering: Enhancing sustainable plant ecosystem productivity. *Rhizosphere*. 3: 233–243.
3. Angulo, V., E. Sanfuentes, F. Rodríguez, y K. Sossa. 2014. Caracterización de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de *Eucalyptus nitens*. *Rev. Argent. Microbiol.* 46(4): 338–347.
4. Astroza, G. 2018. Respuesta de plantas de tomate inoculadas con bacterias productoras de acc-deaminasa al estrés por salinidad. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán.
5. Baiano, S., A. Fabiani, F. Fornasier, A. Ferrarini, M. Innangi, S. Mocali, and L. Morra. 2021. Biowaste compost amendment modifies soil biogeochemical cycles and microbial community according to aggregate classes. *Agric. Ecosyst. Environ., Appl. Soil Ecol.* 168: 104-132.
6. Bashan, Y., L. de-Bashan, R. Prabhu, and J. Hernández. 2014. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant Soil*. 378(1-2): 1-33.
7. Bashan, Y and de-Bashan, L. 2015. Inoculant preparation and formulations for *Azospirillum* spp. *Handbook for Azospirillum*. 469–485.
8. Baudh, K., S. Kumar, R. Singh and J. Korstad. 2020. Ecological and practical applications for sustainable agriculture. (1): 153-195.
9. Buitrago, B., R. Gonzales, L. Bashan y R. Pedraza. 2021. Rol de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. *AGROSAVIA*. 58: 109.
10. Budak, H, M. Kantar and K. Yucebilgili. 2013. Drought Tolerance in Modern and Wild Wheat. *Sci. World J.* 2013: 1–16.
11. Camelo, M, S. Vera y R. Bonilla. 2011. Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecuaria*. 12(2): 159-166.
12. Cano, M. 2011. A review of interaction of beneficial microorganisms in plants: Mycorrhizae, *Trichoderma* spp. and *Pseudomonas* spp. *U.D.C.A.* 14(2): 15-31.
13. Cedeño, G. 2018. Tolerancia a estrés hídrico y promoción del crecimiento en alfalfa (*Medicago sativa*) inoculada con bacterias de la rizósfera. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Dirección de Postgrado, Chillán.
14. Cerna, T, E. Salinas and B. Soriano. 2018. Sinergism between *Azotobacter chroococcum* and *Bradyrhizobium yuanmingense* in the growth of *Lactuca*

sativa "lettuce". Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ciencias Biológicas, Dpto. de Microbiología y Parasitología.

15. Cortés, S, N. Vesga, A. Sigarroa, L. Moreno, y D. Cárdenas. 2015. Sustratos inoculados con microorganismos para el desarrollo de plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en etapa de vivero. *Bioagro*. 27(3): 151-158.
16. FAO. 2020. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Roma.
17. Glick, BR. 2014. Las bacterias con ACC desaminasa pueden promover el crecimiento de las plantas y ayudar a alimentar al mundo. *Invest. Microbiol*. 169(1): 30–39.
18. Granados, B. 2022. Las rizobacterias y su contribución a la tolerancia de las plantas a la sequía y a la salinidad. *Cuba. J. Agric. Sci*. 56(2): e06.
19. Harrison, R. 2008. Composting and formation of humic substances. *Encyclopedia of Ecology*. 713–719.
20. Jaramillo, M, A. Barrera, E. Torres, H. Martínez, H. Prieto y J. Carriel. 2016. Producción de ácido indol-3-acético por *Pseudomonas veronii* R4 y formación de raíces en hojas de vid "Thompson seedless" in vitro. *Cienc. Tecnol*. 9: 31-36.
21. Jiménez, L, M. Fonseca, A. García, S. Infante y J. Vázquez. 2019. Efecto de diferentes concentraciones de Ácido Indolacético (AIA) en el enraizamiento in vitro de *Dahlia* sp. *Cultivos Tropicales*. 40(1): e11
22. Jiménez, R, S. Valdés, V. Olalde, R. Abraham, y J. García. 2018. Efecto del pH y temperatura sobre el crecimiento y actividad antagónica de *Bacillus subtilis* sobre *Rhizoctonia solani*. *Rev. Mex. fitopatol*. 36(2): 256-27.
23. Lara, C, L. Oviedo y C. Betancur. 2011. Bacterias nativas con potencial en la producción de ácido indolacético para mejorar los pastos. *Zootec. Trop*. 29(2): 187-194.
24. León, M, J. Felipez y N. Ortuño. 2019. Evaluación de bacterias endófitas promotoras de crecimiento en el cultivo de quinua. *J Selva. Andina. Biosph*. 7(2): 88-99.
25. Linares, D, M. Ramírez, G. Ferrer y C. Colmenares. 2020. Efecto del riego deficitario controlado sobre el rendimiento del cilantro y su asociación con el cebollín. *Bioagro*. 32(1): 23-30.
26. NCh 2880-2015. Norma Chilena de Compost 2880-2015: Compost, clasificación y requisitos, Instituto Nacional de Normalización (INN). TMECC 07.01-B, TMECC 07.02.

27. May, C, A. Pérez, E. Ruiz, A. Ic y A. García. 2011. Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. Y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. Trop. subtrop. Agroecosyt. 14(3): 1039-1045
28. Medina, P y N. Nuñez. 2015. Efecto de compost inoculado con bacterias de los géneros *Azotobacter* Y *Novosphingobium* fijadoras de nitrógeno en el rendimiento de olivo (*Olea europaea* L.) en la Yorda — Tacna, 2011-2012. Cienc. desarro. (Tacna). 20: 27-30.
29. Medina, G. 2017. Respuesta de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* mill) inoculadas con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), al estrés hídrico. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán.
30. Mejia, M, J, Menjivar y G. Marin. 2014. Respuesta fisiológica de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) a la disponibilidad de agua en el suelo. Acta Agronómica. 63(3): 246-252.
31. Mishra, B, P. Dubey, O. Aishwath, K. Kant, Y. Sharma and M. Vishal. 2017. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on coriander (*Coriandrum sativum*) growth and yield under semi-arid condition of India. Indian J. Agric. Sci. 87: 607-612.
32. Moreno, F y P. Liz. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agron Colomb. 27(2): 179-191.
33. Muñoz, M. 2019. Determinación del efecto del compost como mejorador de suelos. Repositorio de la Universidad Privada del Norte.
34. Mutumba, F, E. Zagal, M. Gerding, D. Castillo, L. Paulino and M. Schoebitz. 2018. Plant growth promoting rhizobacteria for improved water stress tolerance in wheat genotypes. J. Soil Sci. Plant Nutr. 18(4): 1080-1096.
35. Nadeem, S, M. Imran, M. Naveed, M. Khan, M. Ahmad, Z. Zahir and D. Crowley. 2017. Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. J. Sci. Food Agric. 97(15): 5139–5145.
36. ONU, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241.
37. Onwosi, C, V. Igbokwe, J. Odimba, I. Eke, M. Nwankwoala, I. Iroh and L. Ezeogu. 2017. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. J. Environ. Manage. 190: 140-157.
38. Orona, C y R. Leos. 2020. Estudios sobre el manejo orgánico del suelo en el norte de México. Reporte de Investigación núm. 97. México: Universidad

Autónoma Chapingo, CIESTAAM.

39. Pérez, J. 2019. Efecto de la co-inoculación rizobio-PGPR en la tolerancia a déficit hídrico y producción de materia seca en lenteja (*Lens culinaris*). Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán.
40. Pii, Y, T. Mimmo, N. Tomasi, R. Terzano, S. Cesco and C. Crecchio. 2015. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review. *Biol. Fertil. Soils*. 51(4): 403–415.
41. Ponce, S. 2014. Germinación y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Capitata inoculada con rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán.
42. Reyes, C, M. Gerding, P. Oyarzúa, E. Zagal, J. Gerding and S. Fischer. 2019. Plant growth-promoting rhizobacteria able to prove NPK availability: selection, identification and effects on tomato growth. *Chil. J. Agric. Res.* 79(3): 473-485.
43. Rojas, D, C. Hernández y G. Santoyo. 2016. Evaluación de *Bacillus* y *Pseudomonas* para colonizar la rizosfera y su efecto en la promoción del crecimiento en tomate (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.). *Rev Chapingo Ser Hortic.* 22(1): 45-58.
44. Sánchez, R y P. Guerra. 2022. *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Rev. Mexicana cienc. agric.* 13(4): 715-725.
45. Sepúlveda, M, M. Gerding, R. Wilckens y S. Fischer. 2013. Aislamiento, selección y evaluación de bacterias promotoras de crecimiento (PGPR) en lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Capitata Desert storm. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán.
46. Vega, P, H. Canchignia, M. González y M. Seeger. 2016. Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales.* 37(1): 33-39.
47. Widnyana, I and C. Javandira. 2016. Activities *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* sp. To Stimulate Germination and Seedling Growth of Tomato Plants. *Agric Agric Sci Procedia.* 9: 419-423.